

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА  
ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

*На правах рукопису*

**Василенко Вадим Борисович**

**УДК 624.014:624.042 (043.3)**

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАННИЙ СТАН ПЕРФОРОВАНИХ  
ПРОГОНІВ Z-ПОДІБНОГО ПРОФІЛЮ В УМОВАХ КОСОГО ЗГИНУ**

**05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди**

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Науковий керівник –  
кандидат технічних наук, доцент  
Романюк Володимир Володимирович**

**Рівне – 2015**

## Зміст

Вступ	5
<b>Розділ 1. Аналіз теоретично-експериментальних досліджень перфорованих конструкцій за різних умов їх роботи</b>	<b>13</b>
1.1. Конструкції суцільних та наскрізних прогонів та особливості їх конструювання	13
1.2. Застосування перфорованих конструкцій у сучасній практиці будівництва	16
1.3. Основні теоретичні засади щодо розрахунку перфорованих елементів за дії різних силових факторів	22
1.4. Експериментально-теоретичні дослідження конструкцій на основі перфорованих елементів	28
1.5. Основні теоретичні передумови розрахунку елементів, що працюють в умовах косого згину	35
1.6. Висновки до розділу 1	37
<b>Розділ 2. Дослідження напружено-деформованого стану перфорованих елементів у програмному комплексі „Ліра”</b>	<b>39</b>
2.1. Метод скінчених елементів у моделюванні перфорованих профілів	39
2.2. Перерізи перфорованих елементів, що працюють в умовах косого згину	42
2.3. Визначення напружено-деформованого стану перфорованого прогону Z-подібного профілю	47
2.4. Висновки до розділу 2	60
<b>Розділ 3. Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану перфорованого прогону в умовах</b>	<b>62</b>

<b>косого згину</b>	
3.1.	Мета та задачі експериментальних досліджень 62
3.2.	Конструкція дослідного зразка та його виготовлення 63
3.3.	Прилади для вимірювання напружень і деформацій 65
3.4.	Експериментальна установка та обладнання 68
3.5.	Методика проведення експериментальних досліджень 74
3.6.	Аналіз результатів експериментальних досліджень 76
3.6.1	Аналіз напруженого стану перфорованого прогону 76
3.6.2	Деформативність конструкції 85
3.7	Руйнування експериментальної конструкції прогону 87
3.8.	Висновки до розділу 3 90
<b>Розділ 4.</b>	<b>Розрахунок перфорованих профілів в умовах косого згину 92</b>
4.1.	Основні передумови для розрахунку Z-подібних перфорованих профілів в умовах косого згину 92
4.2.	Особливості розрахунку перфорованого прогону в умовах косого згину 105
4.3.	Дослідження деформативності конструкції в двох площинах залежно від відстані між точками закріплення 116
4.4.	Алгоритм розрахунку перфорованого Z-подібного прогону 125
4.5.	Висновки до розділу 4 129

<b>Розділ 5</b>	<b>Числові дослідження перфорованого прогону</b>	<b>131</b>
	<b>Z-подібного профілю прольотом 6 м</b>	
5.1.	Вихідні дані	131
5.2.	Визначення розрахункових зусиль в конструкції	131
5.3.	Підбір перерізу прогону покриття	132
5.3.1.	Суцільний профіль	132
5.3.1.1.	Підбір перерізу балок 1-го класу	132
5.3.1.2.	Підбір перерізу балок 2-го і 3-го класів	134
5.3.2.	Перфорований профіль	136
5.3.2.1.	Підбір перерізу балок 1-го класу	136
5.3.2.2.	Підбір перерізу балок 2-го і 3-го класів	145
5.4.	Висновки до розділу 5	150
	Загальні висновки	151
	Список використаних джерел	153
	Додаток А. Результати числових досліджень перфорованих елементів у програмному комплексі „Ліра”	172
	Додаток Б. Результати експериментальних досліджень перфорованих прогонів	191
	Додаток В. Документи про впровадження	202



## ВСТУП

**Актуальність теми.** Широке використання металевих конструкцій у сучасному будівництві зумовлене їх підвищеною ефективністю та економічністю, які досягаються в першу чергу за рахунок відносної легкості матеріалу, значно меншої трудоемності виготовлення, використання стандартних транспортних засобів для перевезення, швидкісного монтажу та порівняно невеликих витрат під час експлуатації. Задоволення економічних потреб досягається шляхом зниження маси конструкцій, підвищення рівня їх технологічності та продуктивності праці на всіх етапах, починаючи з проектування і закінчуючи монтажем, що в комплексі дозволяє зменшити терміни будівництва і, таким чином, отримати додатковий економічний ефект від більш раннього початку експлуатації об'єкта. Окрім того, робота металевих конструкцій є прогнозованою у часі за різних умов їх експлуатації, оскільки однорідність структури сталі та існуючі методи розрахунку та виконання робіт дозволяють це передбачити.

Аналіз існуючих конструктивних рішень каркасів будівель різноманітного призначення і особливо конструктивних рішень несучих конструкцій покриття, які мають ухил верхнього поясу в межах  $0^\circ \dots 25^\circ$ , дозволяє зробити висновок, що зменшення їх матеріаломісткості у сучасних економічних умовах є досить актуальною задачею.

Застосування легких покрівельних матеріалів та виробів, таких як профільовані листи та різноманітні утеплювачі, а також виконані на їх основі тришарові панелі типу „сендвич”, вимагають використання прогонів для їх обпирання, які з огляду на ухили покрівель громадських і виробничих будівель найчастіше працюють в умовах складного напружено-деформованого стану, а саме косого згину, і які характеризувалися б порівняно невеликими витратами сталі.

Прагнення отримати такі конструкції, які є економічними та водночас ефективними, призвело до розробки концепції легких сталевих конструкцій,

що втілена в низці нових конструктивних форм, серед яких чільне місце обіймають перерізи, виконані на основі прокатних та гнутих профілів. Вони характеризуються малою вагою та потоковими методами виготовлення, завдяки чому значно скорочуються терміни будівництва та зменшуються транспортні витрати. Одними з таких ефективних видів перерізів є розвинуті або перфоровані профілі, що можуть використовуватися як прогони у несучих конструкціях покриття.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертаційної роботи відповідає актуальним напрямкам науково-технічної політики України в галузі оцінювання технічного стану будівель та споруд згідно з постановою Кабінету Міністрів України № 409 від 05.05.1997 р. „Про забезпечення надійності і безпечної експлуатації будівель, споруд та інженерних мереж”. Проведені експериментально-теоретичні дослідження є одним з етапів робіт, які включені в план наукових досліджень і виконуються на кафедрі промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд Національного університету водного господарства та природокористування щодо вивчення дійсної роботи перфорованих елементів, а також конструкцій на їх основі відповідно до тематики комплексних тем „Розробити нові та удосконалити існуючі методи розрахунку будівельних конструкцій, включаючи підсилені, при дії одноразових та повторних навантажень” (державний реєстраційний номер 0112U001122) та „Дослідження роботи та удосконалення методів розрахунків будівельних конструкцій при різних режимах зовнішніх впливів” (державний реєстраційний номер 0107U004181).

**Мета і задачі досліджень.** Вивчення роботи і напружено-деформованого стану перфорованого прогону Z-подібного профілю в умовах косого згину та розробка методики його розрахунку на основі проведення комплексних експериментально-теоретичних досліджень.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити такі задачі:

1) виконати аналіз існуючих конструктивних рішень перфорованих конструкцій та їх експериментально-теоретичних досліджень за різних видів напружено-деформованого стану, а також конструкцій, що працюють в умовах косого згину;

2) розробити та обґрунтувати конструктивну форму перфорованого прогону покриття Z-подібного профілю для покрівель з ухилом в межах  $0^\circ \dots 25^\circ$  на основі існуючих рекомендацій щодо встановлення раціональних параметрів розрізу вихідного прокатного швелера;

3) виконати теоретичні дослідження напружено-деформованого стану перфорованих елементів, що працюють в умовах косого згину, за методом скінчених елементів у програмному комплексі „Ліра”;

4) провести комплексні експериментальні дослідження розробленої конструкції прогону на зразку, що виконаний в натуральну величину, з метою визначення дійсного напружено-деформованого стану та виконати порівняльний аналіз результатів експериментальних та теоретичних досліджень;

5) розробити методику розрахунку перфорованих елементів Z-подібного профілю в умовах косого згину за граничними станами першої і другої груп з урахуванням і без урахування закріплення із площини конструкції;

6) розробити рекомендації щодо розрахунку перфорованого прогону Z-подібного профілю в умовах косого згину за граничними станами першої і другої груп.

**Об’єкт досліджень** – сталевий перфорований прогон Z-подібного профілю прольотом 6 м, виконаний на основі прокатного швелера №22У/ДСТУ 3436–96 з коефіцієнтом розвитку висоти профілю 1,2.

**Предмет досліджень** – робота, несуча здатність та напружено-деформований стан перфорованого прогону Z-подібного профілю в умовах косого згину за кутів нахилу покрівлі в межах  $0^\circ \dots 25^\circ$ .

**Методи досліджень:** аналіз літературних джерел; теоретичні та числові дослідження, у тому числі за методом скінчених елементів у програмному комплексі „Ліра”; експериментальні дослідження напружено-деформованого стану перфорованої конструкції із застосуванням сучасних методів, зокрема методу тензорезистивного вимірювання деформацій для визначення напружень, методу прямого заміру переміщень прогиномірами та індикаторами для визначення прогинів згідно з чинними нормативними та інструктивними документами та загальноприйнятими методиками; порівняльний аналіз теоретичних та експериментальних результатів досліджень.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

1) розроблено та обґрунтовано конструктивну форму перфорованого прогону покриття Z-подібного профілю для покрівель з ухилом в межах  $0^\circ \dots 25^\circ$  на основі існуючих рекомендацій щодо встановлення раціональних параметрів розрізу вихідного прокатного швелера;

2) розроблено методику розрахунку перфорованих елементів Z-подібного профілю в умовах косого згину за граничними станами першої і другої груп на основі теоретичних та числових досліджень напружено-деформованого стану таких конструкцій за методом скінчених елементів у програмному комплексі „Ліра”.

3) вперше отримано нові експериментальні дані про напружено-деформований стан сталей перфорованих прогонів Z-подібного профілю в умовах косого згину на основі проведення комплексних експериментальних досліджень розробленої конструкції на зразку, що виконаний в натуральну величину, та виконано порівняльний аналіз результатів експериментальних та теоретичних досліджень;

4) розроблено рекомендації щодо розрахунку перфорованого прогону Z-подібного профілю в умовах косого згину за граничними станами першої і другої груп.

**Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій.** Достовірність результатів експериментальних досліджень підтверджується методикою їх проведення, розробленою на підставі чинних нормативів і стандартів, та застосуванням сучасних контрольно-вимірювальних приладів, а також задовільною збіжністю теоретичних та експериментальних результатів досліджень.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблені алгоритм та методика розрахунку перфорованих елементів Z-подібного профілю в умовах косого згину за граничними станами першої і другої груп дозволяють обґрунтовано розраховувати та застосовувати такі профілі для використання їх як прогонів покриття промислових і громадських будівель з ухилом верхнього поясу несучих конструкцій в межах  $0^\circ \dots 25^\circ$ . Запропоновані в дисертаційній роботі формули для визначення напружень і деформацій є простими у використанні як для розрахунку моностаєвих, так і бістаєвих елементів симетричного або несиметричного перерізів. Вони можуть використовуватись не лише для Z-подібного профілю, а і для профілів у вигляді швелера або двотавра.

Окрім того, розроблено і видано рекомендації щодо розрахунку перфорованого прогону Z-подібного профілю в умовах косого згину за граничними станами першої і другої груп. Результати дисертаційних досліджень включено до програм навчальних дисциплін „Конструкції будівель і споруд з металу, деревини та пластмас” і „Прогресивні напрямки дослідження, проектування та застосування будівельних конструкцій”.

**Особистий внесок здобувача.** Найбільш суттєві експериментально-теоретичні результати досліджень, наведені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно і до них насамперед належать:

– розробка та обґрунтування конструктивної форми перфорованого прогону покриття Z-подібного профілю для покрівель з ухилом в межах

0°...25° на основі рекомендацій щодо вибору раціональних параметрів розрізу вихідного профілю;

- виконання теоретичних досліджень напружено-деформованого стану перфорованих профілів, що працюють в умовах косого згину, за методом скінчених елементів у програмному комплексі „Ліра”;

- розробка алгоритму та методики розрахунку перфорованих елементів Z-подібного профілю в умовах косого згину за граничними станами першої і другої груп з урахуванням та без урахування закріплення із площини конструкції;

- проведення комплексних експериментальних досліджень розробленої конструкції прогону на зразку, що виконаний в натуральну величину;

- проведення порівняльного аналізу результатів експериментальних та теоретичних досліджень;

- розробка рекомендацій щодо розрахунку перфорованого прогону Z-подібного профілю в умовах косого згину за граничними станами першої і другої груп.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації доповідались і обговорювались на міжнародних науково-технічних конференціях „Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди” у м. Рівне (2012...2014 р.); Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції за міжнародною участю „Ресурсозберігаючі технології в проектуванні, землевпорядкуванні та будівництві” у м. Кременчук (2014 р.); XI міжнародній науково-практичній конференції „Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація” у м. Полтава (2014 р.); Науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, аспірантів та студентів НУВГП у м. Рівне (2012...2014 рр.).

**Публікації.** Основні положення та експериментально-теоретичні дослідження за темою дисертаційної роботи опубліковані у 8 наукових

працях, у тому числі 6 наукових публікацій у спеціалізованих фахових виданнях, внесених до переліку ВАК України, 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави, 1 стаття у збірнику матеріалів конференції. Видано рекомендації, в яких наведено методику розрахунку перфорованих елементів за граничними станами першої і другої груп в умовах косого згину.

У працях зі співавторами автором особисто виконано:

1) „Покриття виробничих і громадських будівель з використанням металевих конструкцій” // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне, 2012. – Випуск 24. – С. 385–390. – встановлено ефективність використання перфорованих прогонів порівняно з аналогічними існуючими конструктивними елементами покриттів.

2) „Методика проведення експериментальних досліджень перфорованих прогонів в умовах косого згину” // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне, 2013. – Випуск 25. – С. 405–411. – розроблено дослідну установку та дослідну конструкцію для проведення експериментальних досліджень в натурну величину.

3) „Розрахунок перфорованих елементів в програмному комплексі „Ліра” // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне, 2013. – Випуск 25. – С. 412–417. – виконано теоретичні розрахунки перфорованого прогону Z-подібного профілю методом скінчених елементів у програмному комплексі „Ліра”.

4) „Дослідження напружено-деформованого стану перфорованого двотаврового прогону в ПК „Ліра” // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне, 2013. – Випуск 27. – С. 174–181. – виконано теоретичні розрахунки перфорованого двотаврового прогону методом скінчених елементів у програмному комплексі „Ліра”.

5) „Напружений стан перфорованих елементів, що працюють в умовах косого згину” // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди:

Зб. наук. праць. – Рівне, 2014. – Випуск 29. – С. 322–333. – виконано порівняльний аналіз різних методик розрахунку напружено-деформованого стану перфорованого прогону Z-подібного профілю.

6) „Дослідження напружено-деформованого стану перфорованого Z-подібного прогону в ПК „Ліра” // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції за міжнародною участю „Ресурсозберігаючі технології в проектуванні, землевпорядкуванні та будівництві”. – Кременчук, 2014. – С. 94 – 107. – виконано теоретичні розрахунки перфорованого прогону Z-подібного профілю методом скінчених елементів у програмному комплексі „Ліра” на міцність та деформативність.

7) „Дослідні конструкція та установка для проведення експериментальних досліджень напружено-деформованого стану перфорованого прогону Z-подібного профілю в умовах косого згину” // Зб. наук. праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава : ПНТУ, 2014. – Випуск 3(42). – С. 105–107. – удосконалено конструкцію дослідної установки для проведення експериментальних досліджень перфорованого прогону прольотом 6 м у натурну величину.

8) „Деформативность конструкции перфорированного прогона Z-образного профиля в условиях косого изгиба” // Вестник Белорусско-Российского университета. – Могилев, Республика Беларусь. – 2015. – № 1. – С. 111-119. – розрахунок перфорованого прогону Z-подібного профілю на деформативність за різних кроків закріплення поперечних в'язей.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Загальний обсяг роботи становить 207 сторінок, у тому числі 152 сторінок основного тексту, 23 повних сторінок з рисунками та таблицями, 19 сторінок списку використаних джерел із 163 найменувань, 36 сторінок додатків.



## **РОЗДІЛ 1.**

### **Аналіз теоретично-експериментальних досліджень перфорованих конструкцій за різних умов їх роботи**

#### **1.1. Конструкції суцільних та наскрізних прогонів та особливості їх конструювання**

Ефективність сучасного будівництва характеризується низкою показників, основними серед яких є термін будівництва, матеріаломісткість та витрати праці під час монтажу. Основним фактором, від якого залежать всі інші критерії, є витрати матеріалу на несучі та огорожувальні конструкції. Про ефективність певних конструктивних рішень насамперед свідчать витрати будівельних матеріалів і технологія виготовлення конструкцій. З метою досягнення ефективності цих показників конструктивні форми і методи розрахунку конструкцій постійно удосконалюються з одночасним збереженням їх надійності та довговічності. Комплексна реалізація всіх цих положень дозволяє значно зменшити витрати на зведення будівель і споруд.

Шляхи вирішення проблеми економії металу досить різноманітні. В першу чергу це використання сучасних прогресивних прийомів та ідей, основними з яких є:

- 1) пошук нових ефективних конструктивних форм [4, 7, 9, 30, 32, 68, 70, 71];
- 2) удосконалення існуючих методів розрахунку [6, 11, 10, 12, 13, 14, 29, 30, 32, 53, 77, 83, 88, 100, 112, 121, 131];
- 3) використання високоміцних сталей [68, 70, 71];
- 4) оптимізація основних параметрів конструкцій, їх елементів та перерізів із застосуванням сучасних математичних методів і ЕОМ [25, 78, 83, 120, 138, 141, 143, 145, 150, 158];

5) використання ефективних видів прокату та створення нових видів профілів [1, 4, 6, 7, 9, 10, 15, 23, 30, 32, 34, 36, 39, 42, 43, 49, 50, 51, 56, 62, 81];

6) збільшення несучої здатності конструкцій шляхом концентрації металу в зонах роботи матеріалу [83, 84, 86, 88, 91, 99, 106, 108, 112, 119, 133].

Найбільшій економії матеріалу можна досягти шляхом поєднання усіх вищенаведених прийомів та ідей, тобто, одночасно з розробкою ефективних конструктивних форм і методів розрахунку доцільним є застосування високоміцних сталей разом з ефективними видами перерізів, в яких якнайбільше реалізований принцип економії матеріалу.

Покриття виробничих і громадських будівель проектується з використанням прогонів або без них. Покриття без прогонів є більш індустриальними і простішими під час виготовлення, але мають суттєвий недолік – велику вагу. Вага покрівлі з використанням прогонів є значно меншою за рахунок невеликого прольоту огорожувальних елементів.

У покрівлях, що мають значне навантаження від власної ваги і снігу, найчастіше використовують наскрізні прогони довжиною 12 м у вигляді легких ферм (рис. 1.1), схеми і поперечні перерізи яких бувають дуже різноманітними. Елементи таких прогонів виконують з гарячекатаних або гнутих профілів, а за дії невеликих навантажень – з сортової сталі круглої або квадратної форми. Решітчасті прогони розраховують як ферми з нерозрізним верхнім поясом, який працює на стиск зі згином, а інші елементи – сприймають поздовжні зусилля розтягу або стиску.

Суцільні прогони важчі за решітчасті, але значно простіші під час виготовлення та монтажу. Вони використовуються, як правило, якщо крок несучих конструкцій становить до 6 м включно. Суцільні прогони зазвичай виготовляються з прокатних швелерів, рідше з двотаврів. Більш раціональними є прогони з гнутих профілів С- і Z-подібного перерізу (рис. 1.2). Такі прогони можуть мати розвинену, тобто збільшену, висоту за

наявності доволі тонкої стінки. Для забезпечення місцевої стійкості полиць на їх краях влаштовують відгини (див. рис. 1.2).

Суцільні прогони виготовляють за розрізною та нерозрізною схемами. Хоча при нерозрізній схемі витрати сталі на прогони менші, але з метою спрощення монтажу частіше використовують розрізні прогони. Їх кріплять до поясів ферм за допомогою додаткових елементів з кутиків, планок, гнутих елементів з листової сталі тощо.

Ефективне використання прогонів з гнутих профілів можливе лише за умови їхньої сумісної роботи з профільованим настилом покрівлі за нерозрізною схемою у кліматичних умовах з відносно малим сніговим навантаженням.

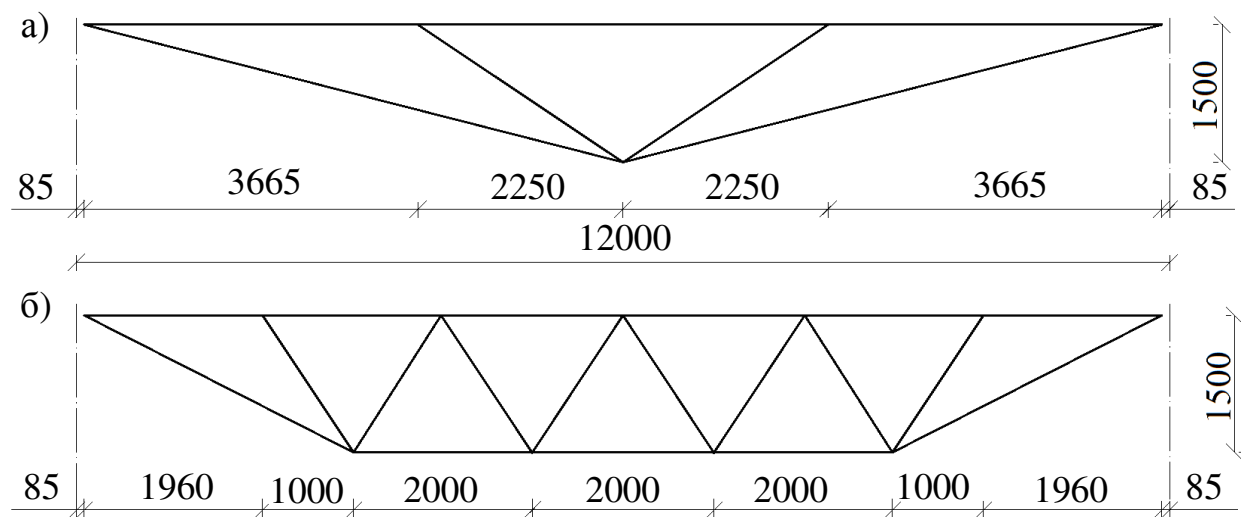


Рисунок 1.1 – Решітчасті прогони  
а – трикутний; б – трапецієподібний

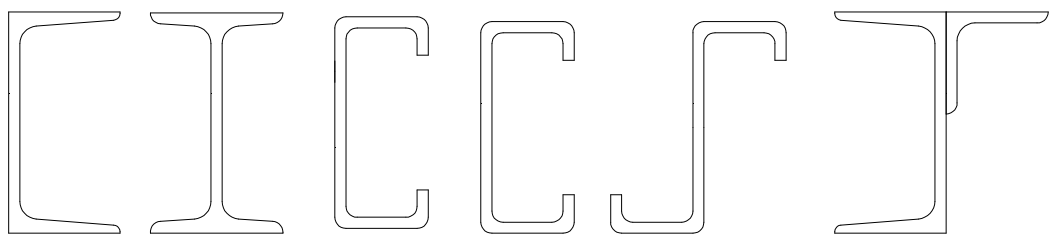


Рисунок 1.2 – Типи перерізів суцільних прогонів

## **1.2. Застосування перфорованих конструкцій у сучасній практиці будівництва**

Як зазначалося вище, існуючі конструктивні рішення покриттів (тобто, з прогонами або без них) мають низку переваг і недоліків. Досягти компромісу між двома типами покриттів можна за рахунок використання перфорованих профілів, які за витратами сталі наближаються до решітчастих, а за вартістю є на 10...15% дешевшими.


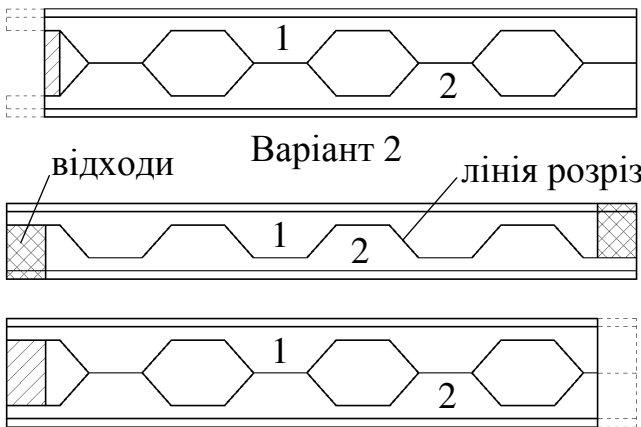
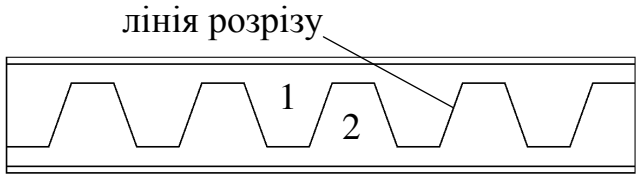
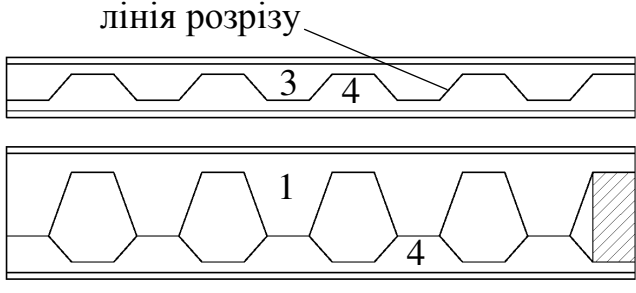
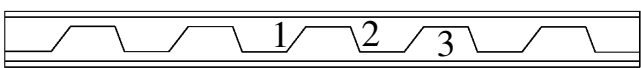
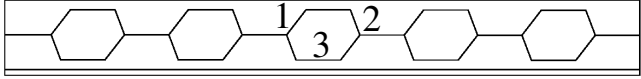

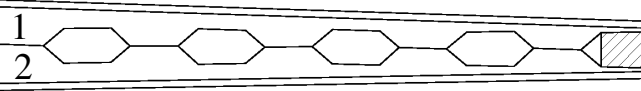
Перфорованими називають профілі, які мають у своїй стінці отвори різної конфігурації: шестикутні, квадратні, круглі, овальні, розміщені у шаховому порядку, подвійної перфорації тощо (табл. 1.1). Такі елементи, отримані шляхом вирізання отворів у стінці, використовуються у різних випадках, особливо тоді, коли немає можливості розмістити інженерні комунікації в іншому місці.

Несуча здатність перфорованих елементів в 1,2...1,5 рази вища за несучу здатність вихідного профілю за рахунок збільшення загальної висоти перерізу порівняно з висотою вихідного елемента. Збільшення несучої здатності таких елементів разом з їх компактністю, транспортабельністю і зручністю під час автоматизованого виготовлення роблять їх конкурентоздатними з решітчастими конструкціями і забезпечують їм доволі широке використання в балкових конструкціях перекриттів і покриттів. Такі конструкції є більш економічними за аналогічні, що виконані із застосуванням прокатних профілів (за витратами металу до 25...40% і за вартістю до 15...25%), незважаючи на деяке збільшення витрат, пов'язаних з виготовленням розвинутого по висоті перерізу профілю [16, 48, 56, 65, 85, 91, 92, 114, 117, 123, 128, 137]. Порівняно зі зварними двотаврами та елементами інших поперечних перерізів вони мають меншу довжину зварних швів, довжину розрізу і тому їх виготовлення потребує менших витрат праці [1, 6, 12, 16, 23, 26, 30, 139, 142].

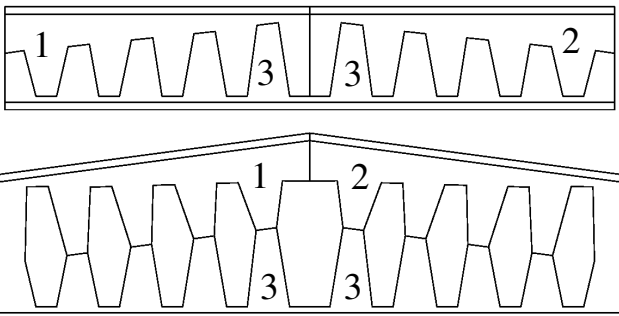
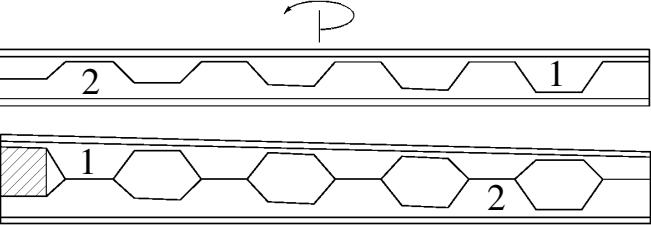
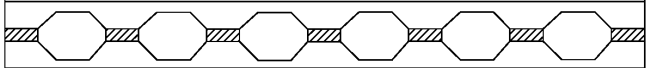

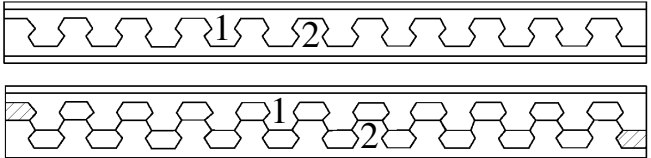
Таблиця 1.1 – Особливості компонування перфорованих профілів

№	Компонування перфорованих профілів	Особливості компонування
1	2	3
1.	<p>лінія розрізу</p>	Лінія розрізу симетрична; тип балок – без вставок із елементів 2 і зі вставками на опорах із елементів 1
2.	<p>лінія розрізу</p>	Лінія розрізу симетрична; нижня частина розрізана на елементи 2 і 3
3.	<p>лінія розрізу</p>	Лінія розрізу несиметрична; компонування балки доцільно використовувати для рівномірно розподіленого навантаження
4.		Балка компонується із двох наскрізних двотаврів, зварених більшими перерізами стиковим швом
5.		Кожна половина лінії розрізу косиметрична відносно своєї середини; верхні поздовжні ділянки лінії розрізу зменшуються до центру, нижні – збільшуються

продовження табл. 1.1

1	2	3
6.	<p style="text-align: center;">Варіант 1</p>  <p style="text-align: center;">Варіант 2</p> 	<p>Лінія розрізу несиметрична; балка з симетричним відносно середини розташуванням отворів; застосовується у випадку зосереджених, регулярно розміщених вантажів; варіанти відрізняються розміром відходів</p>
7.	 	<p>Бісталева балка із частин двох двотаврових профілів різних розмірів та марок сталей; верхня частина балки із маловуглецевої сталі, нижня – із низьколегованої сталі</p>
8.	 	<p>У шестигранних отворах стінки сума довжин проєкцій на поздовжню вісь балки граней 3 і 2 не перевищує довжину проєкції грані 1</p>
9.	 	<p>Балка зі змінною висотою стінки; отримується у результаті розрізу вихідного двотавра за зигзагоподібною діагональною лінією</p>

продовження табл. 1.1

1	2	3
10.		Кожна половина лінії розрізу косометрична відносно своєї середини; верхні поздовжні ділянки лінії розрізу зменшуються до центру, нижні – збільшуються
11.		Балка зі змінною висотою стінки; різання заготовки здійснюють за лінією, що знаходиться між прямими, одна з яких паралельна поясу заготовки
12.		Перфорована балка з додатковими вставками
13.		Перфорована балка з підсиленням перерізів отворів додатковими планками
14.		Дві частини заготовки стикуються бічними гранями, які утворені в результаті розрізу виступів

Ідея утворення перфорованої балки з прокатної відома вже давно. Вперше такі балки були застосовані ще 1910 році в конструкціях моста в м. Чикаго (США) [146]. М. С. Стрелецький наголошував про можливість використання таких балок в СРСР ще в 1934 році [118, 119], але рівень розвитку технологій у той час стримував їх застосування, незважаючи на значну економію сталі. З прогресом у галузі різання та зварювання сталі інтерес до цієї конструктивної форми почав збільшуватись як в СРСР, так і за кордоном.

Відповідно до теорії сортаменту прокатних профілів для швелерів найбільш раціональним є переріз, у якому гнучкість стінок і полиць досягає граничних значень за умовою місцевої стійкості. Але виконати такий переріз методом гарячого прокатування не вдається з технологічних причин, оскільки сучасний універсальний стан дає можливість довести гнучкість стінки лише до  $\lambda = 55$  [108]. Технологія ж виготовлення перфорованих профілів дозволяє отримати гнучкість стінки максимально можливої величини за умовою місцевої стійкості з одночасним збереженням необхідної несучої здатності поясів. При цьому висота конструкції обмежується лише висотою вихідних профілів. Найбільш придатними для виготовлення перфорованих елементів є широкополицеві двотаври, оскільки у них полиці ширші ніж у звичайних двотаврових балок. Це дозволяє використовувати менший вихідний переріз широкополицевого двотавра порівняно з вихідним перерізом звичайного двотавра зі значною економією сталі. У разі відповідного обґрунтування як вихідні профілі для перфорованих конструкцій використовують і швелери.

Отже, ідея виготовлення перфорованих елементів на основі прокатних профілів виникла завдяки таким основним обставинам:

1) прокатні профілі через особливості умов прокатування мають товщину стінки, яка значно перевищує необхідну для забезпечення місцевої стійкості без підкріплення ребрами жорсткості;

2) бажання уникнути використання металу в зонах, де він використовується дуже мало або зовсім не використовується;

3) висота прокатних профілів є, як правило, недостатньою для перекриття великих прольотів, а збільшення висоти балок за рахунок розвинення їх перерізу і застосування, таким чином, перфорованих елементів дозволяє вирішити цю проблему.

Перфоровані профілі виготовляють двома способами:



1) способом зигзагоподібного різання стінки прокатних профілів і подальшого їх складання з суміщенням на напівхвилю і зварюванням стиковими швами гребенів, що виступають (рис. 1.3, а, б);

2) способом з'єднання прокатних таврів чи половинок двотаврів або інших профілів, які розрізані посередині висоти стінки, листовими вставками з проміжками між ними (рис. 1.3, в).

У разі використання першого способу отримують профіль висотою до 1,5 рази більшою за висоту вихідного елемента. При цьому можливі три найбільш типові варіанти:

1) симетричний переріз з одного вихідного профілю (моносталевий елемент);

2) асиметричний переріз з двох вихідних профілів різних марок сталі і розмірів (цей вид бісталевих елементів з перфорованою стінкою за умови правильного вибору перерізу є економічним, оскільки стійкість стінки без ребер в стиснутій зоні можна забезпечити, виконуючи її більшої товщини зі сталі меншої міцності, і, таким чином, зменшити її гнучкість, а нижній розтягнутий елемент – зі сталі підвищеної міцності, але меншої товщини);

3) переріз з додатковими вставками (цей вид конструкцій збільшує витрати праці збірно-зварювальних робіт, але зменшує витрати металу).

У разі використання третього способу перфорована стінка утворюється прямокутними, Х- або трапецієподібними вставками з зазорами між ними. Найбільш слабким місцем таких елементів є місця з'єднання вставки зі стінкою, а також вільні крайки стінок профілів, особливо за дії зосереджених навантажень, які прикладені між вставками. Підсилити ці місця можна встановленням планок (рис. 1.3, г), що дозволить використовувати елементи з перфорованою стінкою не тільки для сприйняття рівномірно розподіленого навантаження, а і для сприйняття зосереджених навантажень, наприклад від легких мостових кранів вантажопідйомністю до 15...20 т.

Для зниження концентрації місцевих напружень в кутах отворів доцільно під час різання виконувати заокруглення, які не підвищують витрат праці зигзагоподібного різку на станках лазерної або водоструминної (гідроабразивної) різки, але можуть значно збільшити ресурс втомної та крихкої міцності перфорованої стінки елемента (рис. 1.3, д).

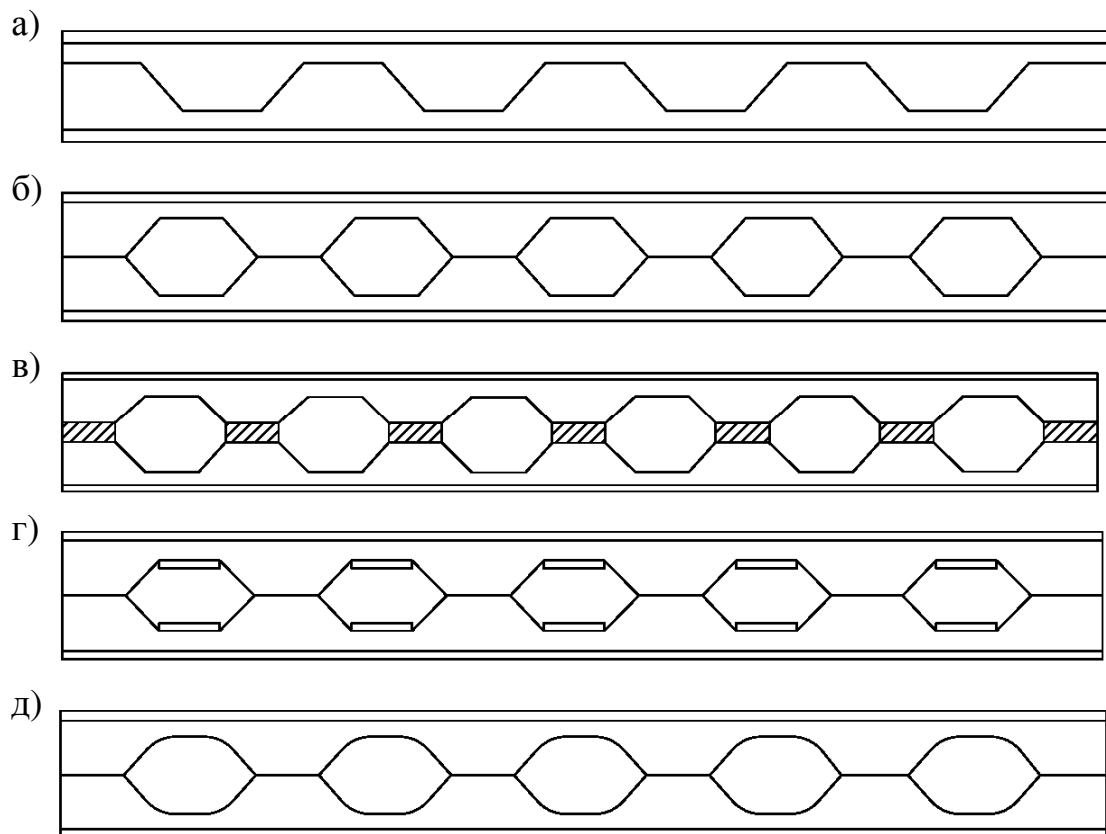


Рисунок 1.3 – Перфоровані елементи

а – лінія різку вихідного профілю, б – профіль, утворений зигзагоподібним різанням стінки; в – профіль, утворений застосуванням вставок; г – з використання планок; д – з заокругленнями кутів отворів

### 1.3. Основні теоретичні засади щодо розрахунку перфорованих елементів за дії різних силових факторів

На сьогодні існує низка методик розрахунку перфорованих елементів у пружній стадії, найбільш відомими з яких є такі:

- 1) за елементарною теорією згину [113, 115];
- 2) як безрозкісної ферми Віренделя [8, 20, 58, 82, 160, 161];
- 3) числовими методами теорії пружності [2, 5, 13, 22, 31, 53, 54];
- 4) за методом скінченних елементів [25, 112, 117, 149, 150];
- 5) за методом теорії складених стержнів [13, 14, 93].

На основі всіх цих теорій побудовано три основні розрахункові моделі, за якими виконують розрахунок перфорованих профілів:

- 1) балка, що має систему регулярно розміщених отворів;
- 2) стержнева розрахункова модель, яка подібна до безрозкісної ферми Віренделя;
- 3) складена балка, що розраховується за теорією складених стержнів.

В розрахунку перфорованого профілю як безрозкісної ферми Віренделя прийнято, що такий елемент є багато раз статично невизначним відносно внутрішніх зусиль. Тому вважається, що в місцях вирізів стінки розміщуються шарніри – точки нульових моментів, в яких виникають лише поперечні та поздовжні сили.

В розрахунку таврового профілю за теорією складених стержнів його робота розглядається як робота стержня з пружними в'язями зсуву, якими в дійсності є перемички стінки. Завдяки їх великій кількості у прольоті можна вважати, що вони працюють незалежно одна від одної. Отже, згинаючий момент і поперечна сила в перерізі:

$$\begin{cases} M = M_f + 2M_t \\ Q = Q_f + 2Q_t \end{cases}, \quad (1.1)$$

де  $M_f; Q_f$  – згинаючий момент і поперечна сила, що умовно сприймаються конструкцією;  $M_t; Q_t$  – згинаючий момент і поперечна сила, що виникають в поясі за відсутності в'язей зсуву.

Найбільш простим є розрахунок, який наведений у нормах проектування сталевих конструкцій [115] і який використовує теорію згину та передбачає,

що напруження в перерізі обчислюються як у звичайній балці, послабленій отвором, з урахуванням додаткового згину елемента від дії поперечної сили, що сприймається балкою.

Отвори у стінці змінюють картину напруженого стану балки. Якщо розподіл нормальних напружень у поясах балки в перерізі посередині отвору близький до лінійного, то в кутових зонах навколо отворів епюри напружень мають криволінійну форму за рахунок концентрації напружень (рис. 1.4). Невелика криволінійність епюри нормальних напружень  $\sigma_x$  спостерігається і у зоні перемички. В стиковому перерізі (4-4) у простінку з'являються нормальні напруження  $\sigma_y$ . Все це свідчить про концентрацію напружень біля отворів [13, 38, 41, 58, 74]. Резервів пластичності достатньо, щоб знівелювати вплив концентраторів напружень і тому вони не чинять помітного впливу на несучу здатність балки. Але потрібно враховувати дію циклічних і/або ударних навантажень, особливо в умовах низьких температур, коли обмежується розвиток пластичних деформацій, і, як наслідок, підвищується вірогідність утворення тріщин у кутах отворів.

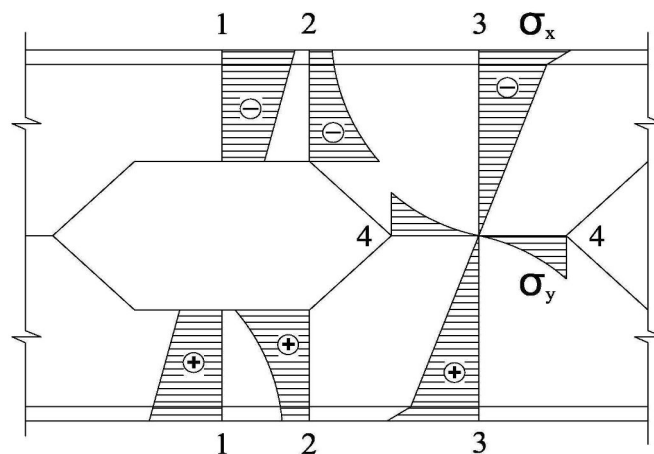


Рисунок 1.4 – Епюри нормальних напружень в перерізах балки

У роботі поясних таврів у межах отворів існують свої особливості – вони знаходяться під дією поперечних сил, які створюють додатковий вигин конструкції. Граничне положення поясу характеризується значним розвитком

пластичних деформацій, які розвиваються у кутах отворів по всій довжині балки. Простінок балки працює на зсув, і його несуча здатність визначається із умови стійкості. У граничному стані може втратити стійкість і стінка одного з таврових поясів, оскільки вони є стиснутими або стиснуто-зігнутими.

За методикою норм проектування [115] перевіряють напруження в точках 1, 2, 3, 4 (рис. 1.5, б), додаючи нормальні напруження від згинаючого моменту до напружень від дії місцевих моментів, які виникають від дії поперечних сил в поясах вздовж несиметричної поздовжньої осі конструкції, з урахуванням розвитку пружно-пластичних деформацій:

$$1) \text{ верхній пояс, точка 1 } \sigma_{sup1} = \frac{M_1 h_1}{J_x} + \frac{Q_{sup1} a}{2 W_{sup,max}} \leq \gamma_c R_{y,sup}; \quad (1.2)$$

$$2) \text{ верхній пояс, точка 2 } \sigma_{sup2} = \frac{M_2 d_1}{J_x} + \frac{Q_{sup2} a}{2 W_{sup,min}} \leq \frac{\gamma_c R_{u,sup}}{\gamma_u}; \quad (1.3)$$

$$3) \text{ нижній пояс, точка 3 } \sigma_{inf3} = \frac{M_1 h_2}{J_x} + \frac{Q_{inf1} a}{2 W_{inf,max}} \leq \gamma_c R_{y,inf}; \quad (1.4)$$

$$4) \text{ нижній пояс, точка 4 } \sigma_{inf4} = \frac{M_2 d_2}{J_x} + \frac{Q_{inf2} a}{2 W_{inf,min}} \leq \frac{\gamma_c R_{u,inf}}{\gamma_u}, \quad (1.5)$$

де  $M_1; M_2$  – згинаючі моменти в характерних перерізах елемента;  
 $J_x$  – момент інерції перерізу конструкції в місці розміщення отвору;  
 $W_{sup,max}; W_{sup,min}; W_{inf,max}; W_{inf,min}$  – максимальні та мінімальні моменти опорів таврів верхнього і нижнього поясів у разі використання несиметричного перерізу;  $Q_{sup1}; Q_{sup2}; Q_{inf1}; Q_{inf2}$  – відповідні поперечні зусилля, які сприймаються тавровими поясами і визначаються пропорційно їх жорсткостям, тобто приймаються коефіцієнти розподілення:

$$1) \text{ для верхнього пояса } \alpha_{sup} = \frac{J_{sup}}{J_{sup} + J_{inf}}; \quad (1.6)$$

$$2) \text{ для нижнього пояса } \alpha_{inf} = 1 - \alpha_{sup}, \quad (1.7)$$

де  $J_{sup}; J_{inf}$  – моменти інерції таврових перерізів верхнього і нижнього поясів.

Отже, поперечні сили в поясах

$$\begin{cases} Q_{sup1} = \alpha_{sup} Q_1; \\ Q_{inf1} = \alpha_{inf} Q_1; \end{cases} \quad \begin{cases} Q_{sup2} = \alpha_{sup} Q_2; \\ Q_{inf2} = \alpha_{inf} Q_2, \end{cases} \quad (1.8)$$

де  $Q_1; Q_2$  – поперечні зусилля в характерних перерізах;  
 $R_{y,sup}; R_{u,sup}; R_{y,inf}; R_{u,inf}$  – розрахункові опори сталі для верхнього і нижнього поясів балки за межею текучості і межею міцності;  $\gamma_c$  – коефіцієнт умов роботи балки.

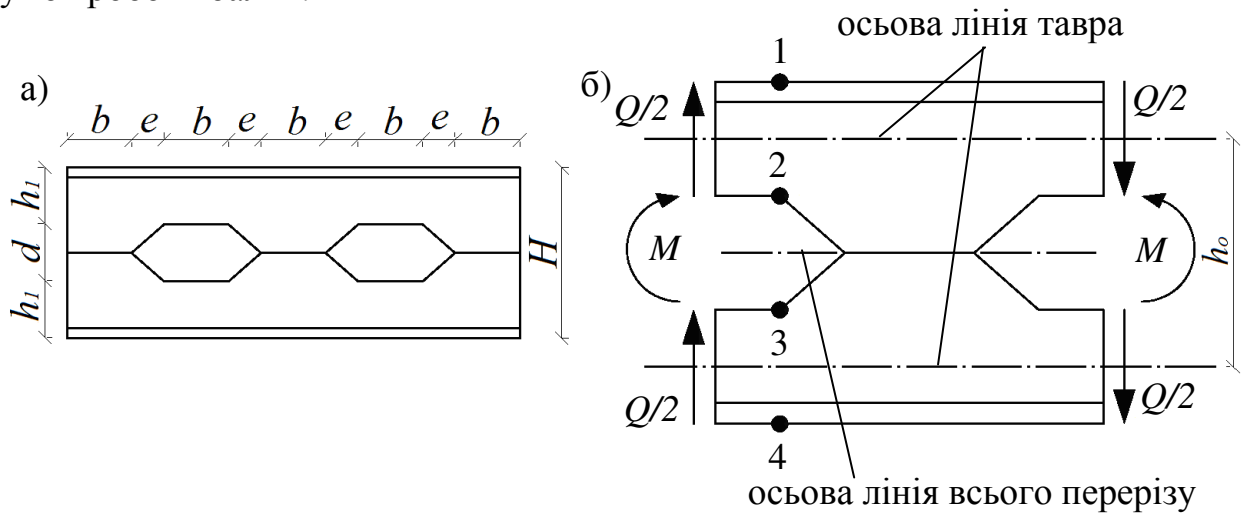


Рисунок 1.5 – До розрахунку елемента з перфорованою стінкою

а – загальний вигляд з параметрами розрізу; б – розрахункова модель

Формули для обчислення напружень у характерних точках перерізу перфорованого елемента за різних умов його роботи, які запропоновані різними дослідниками, наведені в табл. 1.2. Вони об'єднують низку загальних розрахункових положень, основними з яких є:

1) у верхньому та нижньому поясах конструкції в місці послаблення стінки отвором виникають стискаючі та розтягуючі напруження від дії згинаючого моменту;

2) поперечна сила викликає місцевий згин таврових поясів на ділянках з отворами, причому точки перегину розміщені посередині довжини цих ділянок;

3) горизонтальна перерізуюча сила вважається прикладеною в суцільній частині стінки вздовж нейтральної осі балки;

4) теоретичні осі розрахункової моделі проходять через центри ваги таврових перерізів і суцільної ділянки стінки;

5) характер розподілу нормальних напружень в перерізах таврових поясів від згину їх поперечною силою відбувається згідно з гіпотезою плоских перерізів.

Таблиця 1.2 – Формули для визначення напружень в розрахункових точках перерізу елементів з перфорованою стінкою

№	Розрахункові формули	Джерело
1	2	3
1.	т.1 $\frac{MH}{2I_x} + \frac{Qb}{4W_{T,max}} \leq R_y \gamma_c$ т.2 $\frac{Md}{2I_x} + \frac{Qb}{4W_{T,min}} \leq R_u \frac{\gamma_c}{\gamma_u}$	„СНиП II-23-81*” [115]
2.	т.1 $\frac{M}{h_0 A_T} + \frac{Qb}{4W_{T,max}} \leq R_y \gamma_c$ т.2 $\frac{M}{h_0 A_T} + \frac{Qb}{4W_{T,min}} \leq \sigma_T$	Рекомендації „ЦНИИПСК” [91]
3.	т.1 $\frac{MH}{2I_x} + \frac{Qb}{4W_{T,max}} \leq R_y$ т.2 $\frac{Md}{2I_x} + \frac{Qb}{4W_{T,min}} \leq 1,2 R_y$	Рекомендації „ВНИИмонтажспецстрой” [92]

продовження табл. 1.2

1	2	3
4.	т.1 $\frac{MH}{2I_x} + \frac{N}{2A_T} + \frac{Qb}{4W_{T,max}} \leq R_y$ т.2 $\frac{Md}{2I_x} + \frac{N}{2A_T} + \frac{Qb}{4W_{T,min}} \leq R_y$	А. Гогешвілі А. Громацький Г. Каплун [24]
5.	т.2 $\sqrt{\left(\frac{M}{h_0 A_T} + \frac{Qb}{4W_{T,min}}\right)^2 + \frac{0,75 Q^2}{h_t^2 t_w^2}} \leq \sigma_T$	Я. Брутка М. Любинський [20]
6.	т.2 $\frac{M}{h_0 A_T} + \frac{Qb}{4W_{T,min}} \leq [\sigma_T]$	F. Faltus [144] O. Blodgett [142]
7.	т.1 $\frac{(M_{xi} \pm N_{xi} e_{xi}) H}{2J_x} \pm \frac{N_{xi}}{2A_T} + \frac{Q_{xi} b z_1}{4J_1} \leq R_y \gamma_c$ т. 2 $\frac{(M_{xi} \pm N_{xi} e_{xi}) d}{2J_x} \pm \frac{N_{xi}}{2A_T} + \frac{Q_{xi} b y_c}{4J_1} \leq R_y \gamma_c$	В. В. Романюк В. В. Супрунюк [103, 120, 121]

#### 1.4. Експериментально-теоретичні дослідження конструкцій на основі перфорованих елементів

На даний момент науковцями майже усіх розвинутих європейських країн, а також США, Канади та колишнього СРСР проведено велику кількість експериментально-теоретичних досліджень перфорованих елементів та конструкцій на їх основі з використанням різних схем навантаження, прольотів і геометричних характеристик елементів [1, 2, 6, 9, 11, 14, 15, 20, 23, 24, 26, 28, 29, 30, 32, 34, 36, 37, 39, 42, 44, 45, 48, 51, 53, 56, 62, 65, 77, 81, 82, 88, 97, 98, 99, 103, 106, 112, 117, 121, 129, 130, 131, 135].

Конструкцією, яка найчастіше проектується з перфорованою стінкою, є звичайна балка, яка працює на поперечний згин. Але в практиці будівництва успішно себе зарекомендували ригелі та стояки одноповерхових рам, верхні пояси кроквяних ферм, верхні частини колон промислових будівель, арки,



рами, елементи градижень та інші конструкції, що сприймають позацентрово прикладене навантаження та працюють на розтяг або стиск зі згином. За кордоном доволі популярне використання перфорованих елементів як ригелів каркасів багатоповерхових будівель (так звані „smartbeams”).

У цьому випадку використання перфорованих двотаврів доцільно не тільки через економію сталі, але і з метою можливості розміщення і пропуску різноманітних комунікацій через отвори в стінці балок міжповерхових перекриттів і покриттів.

Питанням конструювання та раціонального використання балок з перфорованою стінкою та конструкцій на їх основі присвячені роботи П. Є. Бабичева [40], Е. І. Белені [8], С. І. Білика [11, 50, 136], В. В. Бірюльова [12, 13], В. М. Добрачова [30], Л. Є. Дроб'язко [32, 33, 34, 35, 36, 40, 42], Ю. М. Дукарського [37], М. М. Жербіна [36, 39, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 110, 136], Я. А. Каплуна [23, 56, 114], М. П. Мельникова [68, 69, 70, 71, 72, 87], О. І. Налепи [45, 46, 48, 77], Я. І. Олькова [83], В. В. Романюка [5, 99, 100, 103, 106], Ю. М. Симакова [128], А. І. Скляднева [112], В. В. Супрунюка [99, 103, 106, 120, 121], В. Г. Чернашкіна [128], Ю. Л. Чернова [128], В. С. Чорнолоза [45, 46, 48, 49, 130, 131, 132], М. D. Allfillich [139], O. W. Blodgett [142], F. Faltus [144], C. Fleury [145], I. S. Gibson [146] та інших вчених.

Експериментально-теоретичні дослідження роботи перфорованих елементів проводили В. В. Бірюльов [14], С. І. Білик [11, 44], В. М. Даріпаско [29], В. М. Добрачов [30], Л. Е. Дроб'язко [32], М. М. Жербін [40, 44], А. А. Ільїна [53], В. В. Каленов [135], О. І. Налєпа [44, 77], Я. І. Ольков [83], А. І. Притикін [88], В. В. Романюк [97, 98], А. І. Скляднєв [112], В. В. Супрунюк [97, 98, 121], В. С. Чорнолоз [44, 129, 131] та інші.

Комплексним дослідженням сталевих стиснуто-згинальних елементів попередньо напружених перфорованих арок присвячено роботи В. В. Романюка і В. В. Супрунюка [97, 98, 99, 100, 103, 106, 120, 121]. Ними

було розроблено методику розрахунку перфорованих елементів з урахуванням деформаційної схеми, а також проведено теоретичні та експериментальні дослідження арки в натуральну величину у випадку використання її без розпірки, з ненапруженою розпіркою, з попередньо напруженою розпіркою, з різними значеннями ексцентриситету зміщення зтяжки як для симетричного, так і для несиметричного навантаження конструкції.

В. С. Чорнолозом [44, 45, 46, 48, 49, 129, 130, 131, 132] було розроблено нову ефективну конструктивну форму підкранових балок із розвинутих двотаврів зі змінною по довжині висотою стінки для кранів легкого і середнього режимів роботи вантажопідйомністю до 30 т з обґрунтуванням її оптимальних геометричних параметрів, яка забезпечувала більшу експлуатаційну надійність і давала змогу знизити витрати металу порівняно з вже існуючими конструкціями.

Розробкою ефективної конструктивної форми кроквяної ферми мінімальної металомісткості присвячено роботи О. І. Налепи [44, 45, 46, 48, 77]. Ним було проведено низку теоретичних і експериментальних досліджень, в результаті яких було запропоновано нову конструктивну форму кроквяної ферми з верхнім поясом змінної жорсткості, яка складалася з чотирьох трапецієподібних елементів двотаврового профілю з перфорованою стінкою.

В ході теоретичних і експериментальних досліджень стиснуто-згинальних наскрізних елементів рам з плавно-змінною жорсткістю перерізу С. І. Біликом [11, 44, 50, 136] було запропоновано нову конструктивну форму сталеві колони з перфорованою стінкою змінної висоти для виробничих будівель без мостових кранів, а також методику розрахунку таких елементів на стійкість у разі зміни жорсткості віток і планок.

Найбільш повні вирішення задачі оптимізації перфорованих елементів представлені у працях Я. І. Олькова [83], А. І. Складнева [112], Н. Adeli [138],

A. O. Belegundu [141], M. W. Dobbs [143]. Вирішення питань місцевої стійкості стінки представлено в роботах В. М. Даріпаско [29], В. М. Добрачова [14, 30], Р. Б. Мітчина [73], Я. І. Олькова [83], O. Blodgett [142], M. U. Hosain [150, 151], M. M. Hrabok [151]. Не викликає складностей перевірка міцності зварного шва завдяки роботам M. U. Hosain [150, 151], W. Kanning, W. G. Speirs, а також перевірка загальної стійкості конструкції завдяки A. Bazile, J. Texier.

M. Greenspan, B. Jaffe і A. Stang досліджували центрально навантажені сталеві перфоровані колони двотаврового і швелерного поперечного перерізів, які були утворені з кутиків і з'єднані перфорованим листом на заклепках. Досліджувався вплив розмірів та форм перфорації на несучу здатність стояків, оцінювались коефіцієнти концентрації напружень. Було встановлено, що причиною вичерпання несучої здатності колон була втрата стійкості з площини листа.

В роботах O. Blodgett [142] і R. Delesque перфорована стінка розглядається як зігнута конічна балка, хоча об'єктивно вона є пластиною. W. Kanning розглядає перфоровану стінку, як пластину шириною рівною розміру горизонтальної грані отвору, при цьому вплив іншої частини стінки у розрахунках не враховується. Він отримав можливість перевіряти стійкість вузьких і високих перфорованих стінок. У працях Я. І. Олькова [83] і W. Kanning в розрахунках не враховуються проміжні вставки, наявність котрих збільшує несучу здатність перфорованих балок. Окрім того, втрата стійкості стінки найчастіше проявляється саме в балках з листовими вставками.

Дослідження, які представлені в роботах R. Delesque, W. Kanning, Я. І. Олькова [83], В. М. Добрачова [14, 30], присвячено вивченню стійкості перфорованих стінок за дії поперечної сили. Майже єдиною роботою, яка вивчає стійкість стінки, що навантажена локальним навантаженням, є дослідження Р. Б. Мітчина [73]. Ним запропоновано методику вирішення

задачі стійкості стінки перфорованої балки з врахуванням параметрів різку і діючих зусиль. При цьому простінок зі складною конфігурацією замінюється еквівалентною за об'ємом металу прямокутною пластиною з редукованою (тобто, приведеною) товщиною.

Дотепер не існує єдиної думки, який розмір приймати як розрахункову висоту стінки. В працях В. М. Добрачова [14, 30] і О. Blodgett [142] висота стінки приймається рівною висоті отворів. Експериментально доведено, що в рівнях верхніх і нижніх граней отворів поперечні переміщення стінки мають доволі великі значення, і не можуть не враховуватися.

О. І. Скляднєв [112] досліджував напружений стан перфорованих балок у пружній і пружно-пластичній стадіях роботи і розробляв методику їх оптимізації. В результаті теоретичних і експериментальних досліджень розроблено метод розрахунку, який враховує можливість виникнення того чи іншого граничного стану залежно від геометричних параметрів і співвідношення зовнішніх сил. Вченим встановлено, що необхідно розрізняти два граничних стани перфорованих балок, які наступають внаслідок розвитку пластичних деформацій: по всій товщині полицки і по всій висоті стінки таврового перерізу.

О. І. Притикін [88] займався розробкою методів розрахунку і конструктивних форм балок з однорядною і дворядною перфорацією стінки. В результаті теоретичних і експериментальних досліджень було розроблено рекомендації щодо геометричних характеристик балок з однорядною перфорацією, що дозволяють знизити вагу конструкції на 4...5% порівняно з балкою, яка виготовлялась за загальноприйнятою технологією, і удосконалено методику розрахунку, яка більш точно враховує залежність геометричних параметрів конструкції і її напружено-деформованого стану.

В працях В. М. Добрачова, R. Delesque, W. Kanning, A. Aglan методи оцінки стійкості перфорованої стінки засновані на використанні функцій, які описують поперечні переміщення пластини. Як апроксимуючі приймалися

функції, які відомі з теорії пружності для прямокутних пластин. Але дослідів, які б підтвердили можливість використання цих функцій для перфорованих стінок, не проводилось.

Н. С. Стрелецьким [25, 118, 119] і В. М. Калушиним досліджувались позацентрово стиснуті перфоровані стояки замкнутого профілю, утворені з двох суцільних швелерів, з'єднаних перфорованими листами на заклепках. Було запропоновано розрахункову модель перфорованого стояка, яка зводилась до вирішення моделі складеного стержня.

В. М. Бондаренко удосконалив теорію розрахунку перфорованих балок на основі розрахункової моделі у вигляді безрозкісної ферми типу Віренделя, а також надав рекомендації щодо її оптимізації.

Балки з несиметричною перфорацією стінки знайшли своє відображення в працях Ю. М. Дукарського [37], М. М. Жербіна [39, 40, 42, 43, 44, 45, 48, 49, 50], А. А. Заборського [51], А. А. Ільїної [53], Ю. А. Ковалю, О. В. Михайлової, О. І. Налепи [44, 45, 46, 48, 77], В. А. Пєскова, А. В. Тимохіна, С. В. Царькова, В. С. Чернолоза [44, 45, 46, 48, 49, 129, 131, 132].

В. М. Даріпаско [29] досліджував стійкість за згинно-крутною формою двотаврових стержнів з перфорованою стінкою, навантажених поздовжньою силою з двоосним ексцентриситетом і рівномірно розподіленим навантаженням. Опорні закріплення у двох головних площинах приймалися шарнірними, закручування кінцевих перерізів було відсутнім. При вивченні стійкості згинальна жорсткість в площині стінки визначалася з рівняння для прогину шарнірно обпертої перфорованої балки з шестикутними отворами, яка навантажена рівномірно розподіленим навантаженням. Для вирішення задачі стійкості за згинно-крутною формою використовувалась деформаційна теорія розрахунку пружних стержнів В. З. Власова, узагальнена Б. М. Броуде і Е. А. Бейлінім. Розвиток пластичних деформацій враховувався використанням методики визначення напружень і деформацій

В. П. Коломійця, яка була розповсюджена Г. І. Белим на загальний випадок навантаження. Оцінка достовірності таких спрощень є недостатньою.

Повне використання резервів несучої здатності пов'язано з урахуванням пластичної роботи перфорованих конструкцій. На даний час відомо декілька досліджень, які присвячені роботі перфорованих балок в пружно-пластичній стадії, наприклад роботи В. М. Ворожб'янова, А. І. Складнева [112], M. D. Allfillisch [139], E. Amstutz, J. E. Bower, B. R. Cook, P. Halleux [147], A. A. Toprac та інших науковців.

Оцінка впливу поперечних в'язей на стійкість стиснутих суцільно-стінчастих елементів дана в роботах Д. В. Вайнберга, І. М. Кіселя, А. П. Коновалова, В. В. Катюшина. Відмічено, що подібні дослідження перфорованих елементів відсутні.

Для вирішення задачі стійкості стінки-перемички перфорованої балки В. М. Добрачовим [14, 30] було використано метод Релея-Рітца з записом енергетичного критерію стійкості в формі Брайана. Було враховано дійсні кінематичні умови роботи стінки-перемички перфорованої балки і достатньо добре описано пружну поверхню деформацій, що підтверджено експериментально. Недоліками даного рішення є недостатньо точне описання контурних функцій навантаження пластини (стінки-перемички) і постановку задачі для прямокутної пластини без урахування складної форми отворів.

М. М. Копитовим вивчалася робота перфорованої смуги на розтяг і стиск. Експериментально досліджувались центрально навантажені колони замкнутого профілю. У досліджах було запропоновано методику оцінки місцевої стійкості стінки-перемички перфорованого двотавра з восьмикутними отворами при стиску, згині, зсуві та їх сумісній дії. Рішення отримано методом скінчених елементів в програмі „Міраж” з урахуванням неоднорідності напружено-деформованого стану багатів'язевої системи при варіюванні усіма геометричними параметрами перфорованого двотавра. В

результаті роботи отримано набір коефіцієнтів, що визначаються з графіків, за допомогою яких визначаються критичні напруження. Недоліком даного рішення є відсутність теоретичного обґрунтування значень коефіцієнтів, які входять у рівняння для визначення критичних напружень.

### 1.5. Основні теоретичні передумови розрахунку елементів, що працюють в умовах косого згину

У загальному випадку елементи, які розміщені на схилі покрівлі, працюють на згин у двох площинах, тобто виникає так званий косий згин (рис. 1.6).

Косим називають такий згин, за якого площина дії сумарного згинаючого моменту в перерізі балки не збігається з жодною з головних площин інерції  $O_{xy}$  і  $O_{xz}$  (рис. 1.6, а). Розрізняють два види косого згину: плоский і просторовий. За плоского косого згину зовнішні сили діють в одній площині, яка не збігається з головними осями інерції. У разі просторового згину зовнішні сили діють у різних площинах.

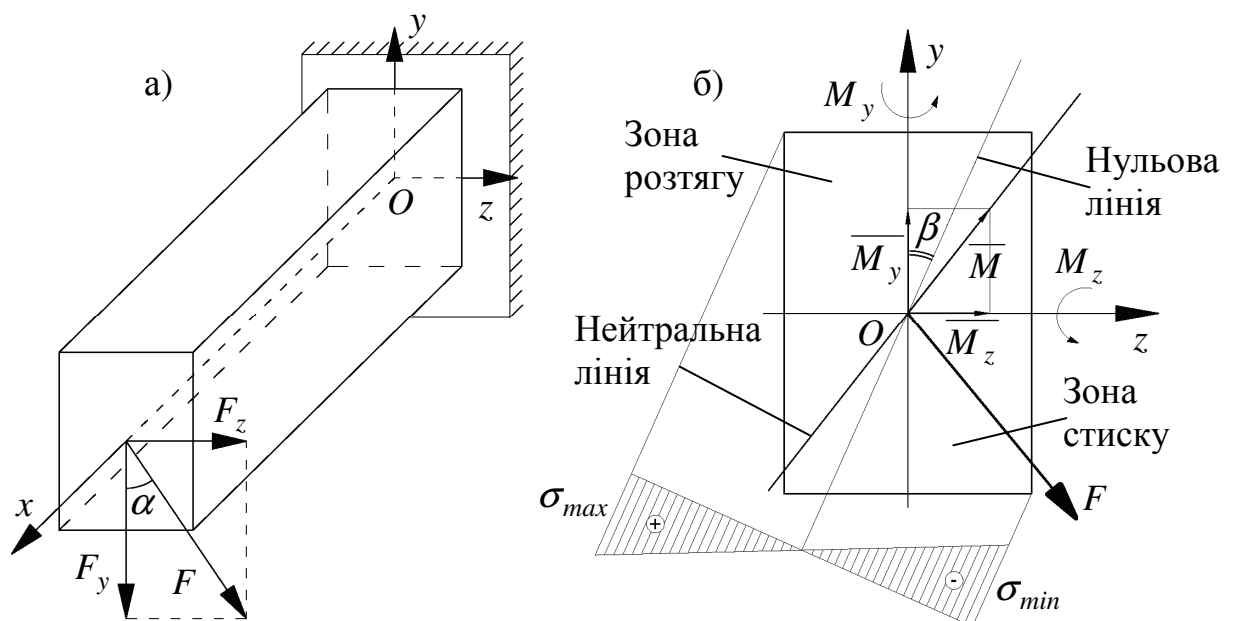


Рисунок 1.6 – Схема роботи елемента

а – загальний вигляд елемента; б – поперечний переріз елемента

Як при плоскому, так і при просторовому згинах виникають чотири внутрішні силові фактори: згинальні моменти  $M_z$  і  $M_y$  та поперечні сили  $Q_z$  і  $Q_y$ . Вплив останніх в більшості випадків є незначним. Моменти  $M_y$  і  $M_z$ , які діють у головних площинах інерції, складають сумарний згинаючий момент  $M$ , який можна розкласти на складові:

$$\begin{cases} M_z = M \cos \alpha; \\ M_y = M \sin \alpha. \end{cases} \quad (1.9)$$

Визначення нормальних напружень і деформацій за косого згину засновано на принципі незалежності дії сил. Все навантаження проектується на дві головні площини балки і будуються епюри згинальних моментів у двох площинах. Після цього за відомими формулами для прямого згину визначають нормальні напруження. Результируюче напруження визначають алгебраїчною сумою

$$\sigma_{z,y} = \frac{M_z}{J_z} y + \frac{M_y}{J_y} z \leq R_y \gamma_c, \quad (1.10)$$

де  $M_z; M_y$  – згинаючі моменти у відповідних площинах,  $J_z; J_y$  – головні моменти інерції перерізу,  $z$  і  $y$  – координати точки перерізу, в якій визначають нормальні напруження.

З рівняння (1.10) видно, що за косого згину напруження  $\sigma_{z,y}$  змінюються по координатах  $y$  і  $z$  за лінійним законом. Якщо прирівняти ці напруження нулю, то можна отримати рівняння нульової лінії

$$\frac{M_z}{J_z} y_0 + \frac{M_y}{J_y} z_0 = 0, \quad (1.11)$$

де  $z_0$  і  $y_0$  – координати точок нульової лінії (див. рис. 1.6, б).

Вираз (1.11) є рівнянням нульової лінії, тобто прямої, яка проходить через початок координат.



Позначивши кут між нульовою лінією і головною віссю у літерою  $\beta$ , з формули (1.11) шляхом певних перетворень отримано вираз

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{y_0}{z_0} = -\frac{J_z}{J_y} \frac{M_y}{M_z}. \quad (1.12)$$

Знак мінус в даній формулі вказує на те, що нульова лінія проходить через інші квадранти перерізу відносно силової лінії і вона не буде перпендикулярною до площини дії результуючого згинаючого моменту  $M$ , а відхилятиметься до осі, відносно якої момент інерції буде мінімальним.

На підставі гіпотези плоских перерізів у разі деформації балки її поперечні перерізи повертаються навколо нульової лінії. Причому найбільші деформації видовження і вкорочення, і, як наслідок, нормальні напруження виникають в точках, які найбільш віддалені від нульової лінії. Таким чином, для визначення найбільших напружень в перерізі необхідно підставити у формулу (1.10) координати точок, які є найбільш віддаленими від нульової лінії.

## 1.6. Висновки до розділу 1

1) Аналіз літературних джерел засвідчив, що використання перфорованих елементів як самостійних конструкцій, так і у складі конструктивних елементів, у будівництві є недостатньо поширеним, незважаючи на низку їх переваг порівняно з традиційними конструкціями.

2) Використання перфорованих елементів у складі конструкцій покриття дозволяє створювати легкі конструкції різноманітної форми і призначення, які не поступаються традиційним за міцністю, стійкістю та деформативністю.

3) Існуючі теорії і методики розрахунку перфорованих елементів за граничними станами першої та другої груп дозволяють розраховувати такі конструкції на різні силові фактори та їх комбінації, але дійсна робота цих елементів за косого згину є мало вивченою.

4) Враховуючи зростання обсягів будівництва з використанням сталевих конструкцій, особливо як несучих конструкцій покриття, у тому числі і прогонів, що працюють в умовах косого згину, подальші експериментально-теоретичні дослідження у цьому напрямку є досить актуальними.

5) Матеріали розділу опубліковано у роботі [104].

## **РОЗДІЛ 2.**

### **Дослідження напружено-деформованого стану перфорованих елементів у програмному комплексі „Ліра”**

#### **2.1. Метод скінчених елементів у моделюванні перфорованих профілів**

Суть методу скінчених елементів полягає в тому, що будь-яку неперервну величину можна апроксимувати кусочно-неперервною функцією, яка будується на значеннях величини, що досліджується, у скінченій кількості її точок.

Для побудови дискретної моделі неперервної величини перфорованих прогонів було прийнято:

- 1) область величини, яка досліджується, розбивати на скінчене число елементів, що мають спільні вузлові точки і в цілому апроксимують форму області;
- 2) фіксувати вузли в області, яка розглядається;
- 3) значення в середині області визначати у вузлових точках, які апроксимують функцію, використовуючи значення неперервної величини, яка досліджується.

З цієї точки зору конструкції перфорованих прогонів покриття, що працюють в умовах косого згину, розглядаються як сукупність конструкційних елементів (стінки і полиці), які з'єднані в скінченій кількості вузлових точок. Якщо відомі співвідношення між силами і переміщеннями для кожного елемента, то можна описати властивості і дослідити поведінку конструкції в цілому.

Таким чином, у разі використання методу скінчених елементів вирішення крайової задачі для заданої ділянки представлено у вигляді набору функцій, визначених на скінчених елементах.

Моделювання конструкцій перфорованих прогонів в ПК „Ліра” виконувалось для двотаврового, С- і Z-подібних перерізів (рис. 2.1) для чого їх було поділено сіткою скінчених елементів, виходячи з умови  $a \geq 2t$  і  $b \geq 2t$ , де  $a, b$  – відповідно довжина і ширина скінченого елемента,  $t$  – товщини елементів (стінки і полиці), що розбиваються. Скінчені елементи стінки перфорованих профілів прийнято прямокутної форми з розмірами 20x15 мм, полиці – квадратної форми розмірами 20x20 мм. Біля отворів прогону скінчені елементи формувалися три- і чотиривузловими пластинами (рис. 2.2). Такі розміри і форма скінчених елементів дозволяють отримати високу точність розрахунку.

На прогони можуть обпиратися профільований настил і панелі типу „сендвич”, які кріпляться до верхнього поясу конструкції і, таким чином, закріплюють їх з площини дії навантаження, а отже є в’язями у площині схилу. Під час моделювання конструкції прогону в ПК „Ліра” зовнішнє рівномірно розподілене навантаження було зведене до зосереджених сил і прикладене у місцях кріплення панелей „сендвич” шириною 1,2 м. Заміна рівномірно розподіленого навантаження зосередженими силами виконувалось з умови рівності величини згинаючих моментів посередині прольоту конструкції від дії таких навантажень. Для моделювання закріплення прогонів з площини дії навантаження було використано в’язі по верхніх поясах профілю, які розміщено з кроком 1,2 м (рис. 2.3), що відповідає відстаням між точками кріплення панелей типу „сендвич” до прогону. Таким чином було усунуто поперечні деформації конструкції, а також можливий поворот перерізу навколо своєї осі під час прикладання навантаження. Це дозволило максимально наблизити роботу змодельованої конструкції до її реальної роботи.

Моделювання кріплення кінців перфорованого прогону виконувалось як для статично визначної балки: один кінець – шарнірно рухома опора, інший – шарнірно нерухома.

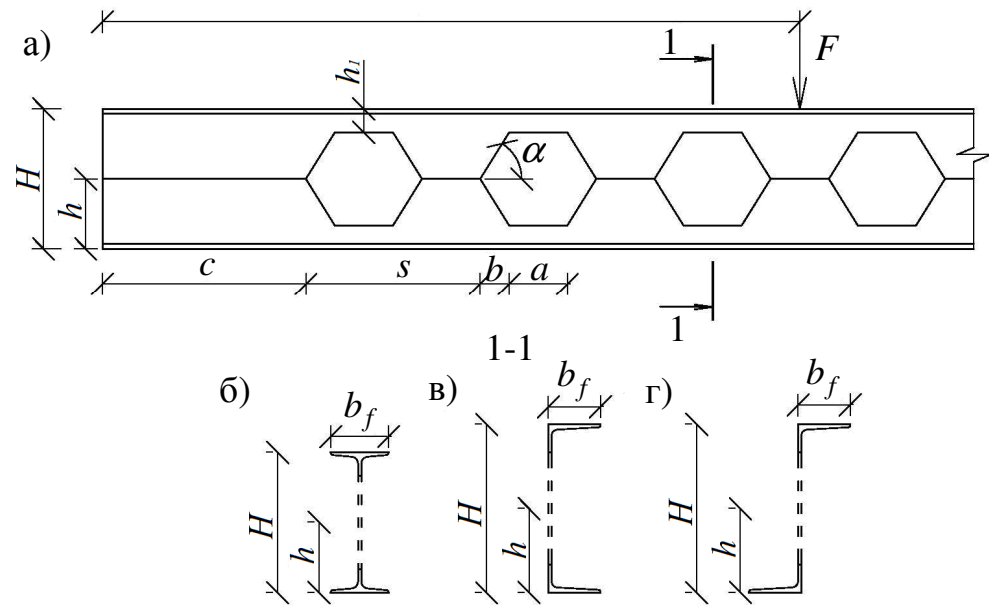


Рисунок 2.1 – Типи перерізів перфорованих профілів

а – фрагмент перфорованого елемента; б, в, г – поперечні перерізи відповідно перфорованих двотавра, С- і Z-подібного профілів

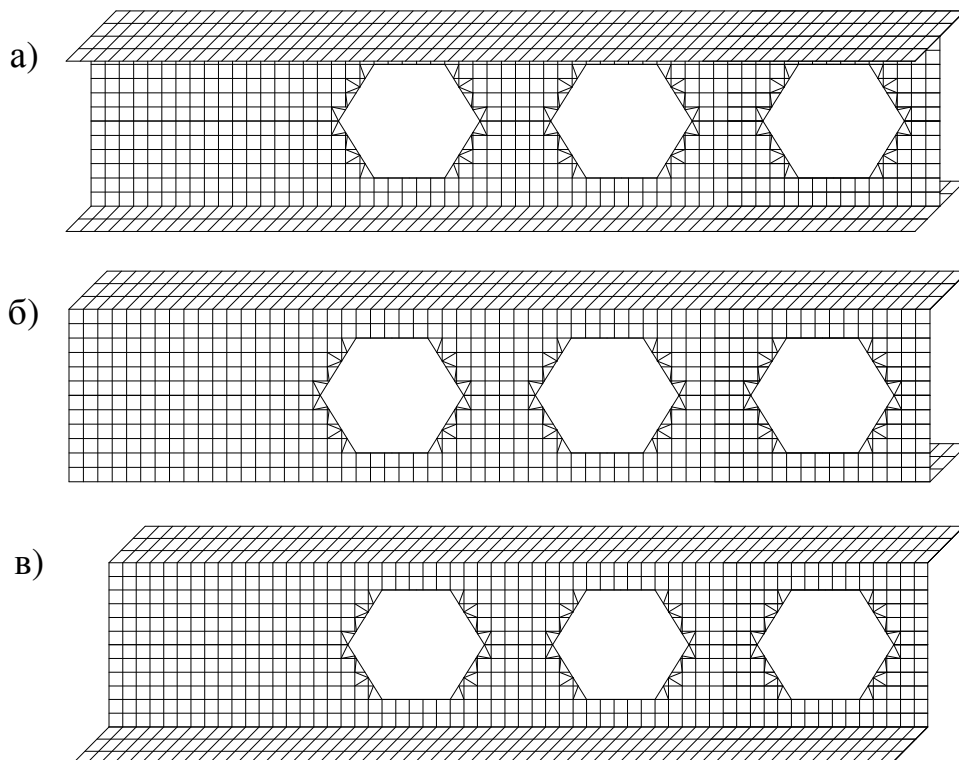


Рисунок 2.2 – Фрагменти перфорованих прогонів, розбитих на скінчені елементи

а – двотавровий профіль; б – С-подібний профіль; в – Z-подібний профіль

## 2.2. Перерізи перфорованих елементів, що працюють в умовах косого згину

Виходячи з поставленої мети та задач досліджень, а також розробленої в розділі 3 методики експериментальних досліджень, було запроектовано перфоровані прогони прольотом  $l = 6$  м з вихідного прокатного двотавра 20Б1/ГОСТ 26020–83 і швелера 22У/ДСТУ 3436–96 у вигляді С- і Z-подібного профілів. Номери вихідних профілів визначені виходячи з умови їх однакової несучої здатності за граничними станами II групи. Геометричні розміри отриманих перфорованих прогонів (див. рис. 2.1) прийнято на основі рекомендацій щодо вибору раціональних параметрів розрізу стінки вихідних профілів [91, 92] і наведено в табл. 2.1. Коефіцієнт розвитку висоти перерізу досліджуваних прокатних профілів був прийнятим  $k = 1,2$ , що є мінімально допустимим відповідно до цих рекомендацій.

Програмний комплекс „Ліра” дозволяє отримати ізополя нормальних напружень у будь-якому перерізі по довжині прогону (рис. 2.4), а також деформовану схему перфорованого елемента (рис. 2.5).

До конструкції прикладене зовнішнє навантаження у вигляді зосереджених сил, що дає змогу отримати по довжині елемента як зону чистого, так і зону поперечного згинів (рис. 2.6). Оскільки поперечна сила зменшується від опор до середини прольоту, а згинаючий момент навпаки збільшується, то по довжині прогону можна виділити 3 характерні ділянки, на кожній з яких напруження визначались у 2-х перерізах: в перерізі з отвором в точках 1, 2, 3, 4 і в перерізі без отвору в точках 5 і 6 (див. рис. 2.6, г). Конструкції дослідних прогонів наведено на рис. 2.7. Перфоровані прогони розраховувалися для кутів нахилу від  $0^\circ$  до  $25^\circ$  з кроком у  $5^\circ$ . Ізополя нормальних напружень  $\sigma_z$  від дії зовнішнього навантаження, визначеного за граничними станами II групи, на характерних ділянках прогону, наведено на рис. 2.8.

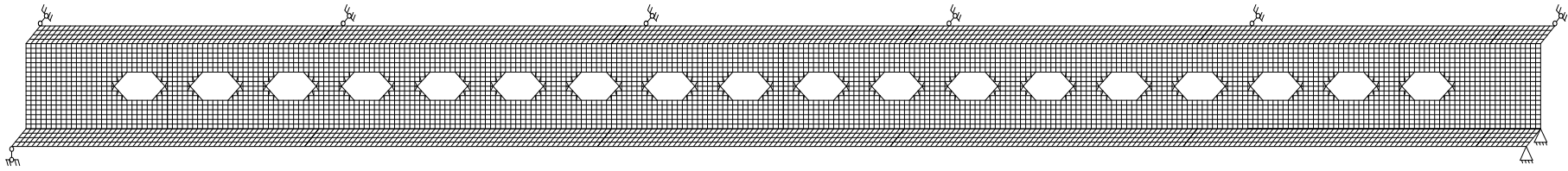


Рисунок 2.3 – Модель закріплення перфорованого прогону в ПК „Ліра”

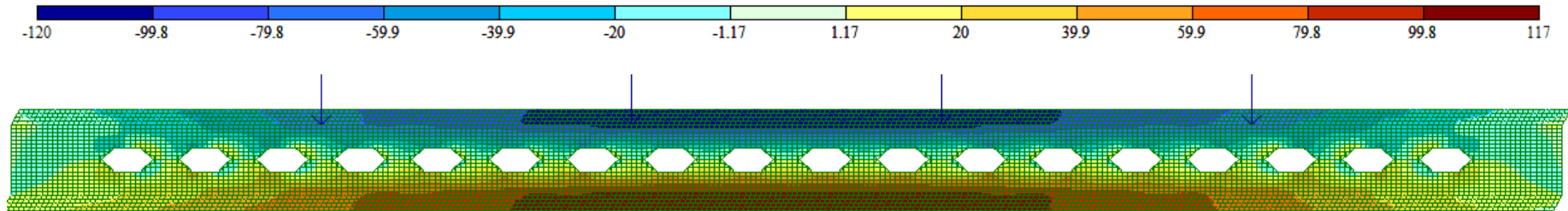


Рисунок 2.4 – Ізополя нормальних напружень по осі Z

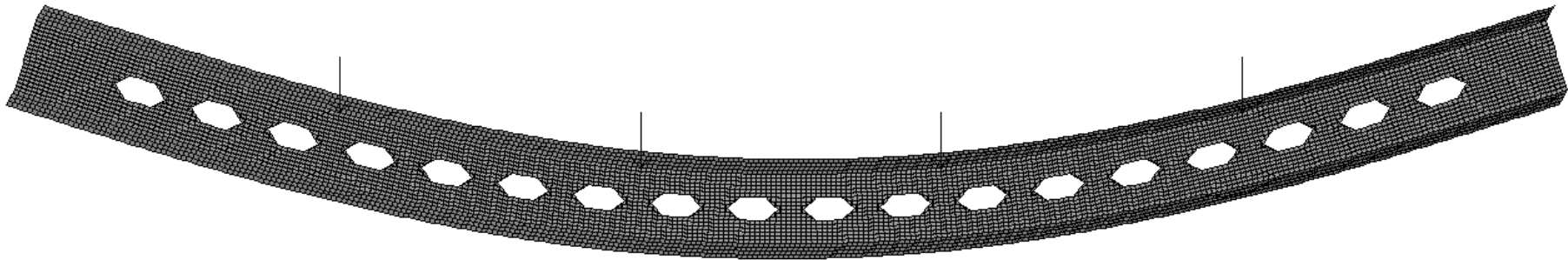





Рисунок 2.5 – Деформована схема Z – подібного перфорованого елемента без закріплень стиснутого поясу

Таблиця 2.1 – Геометричні розміри перфорованих елементів

Тип перерізу	$H$ , мм	$h$ , мм	$b_f$ , мм	$h_l$ , мм	$c$ , мм	$s$ , мм	$a$ , мм	$\alpha$ , град	$b$ , мм
	240	120	100	40	350	150	100	58	50
	264	132	82	88	350	150	100	41	50
	264	132	82	88	350	150	100	41	50

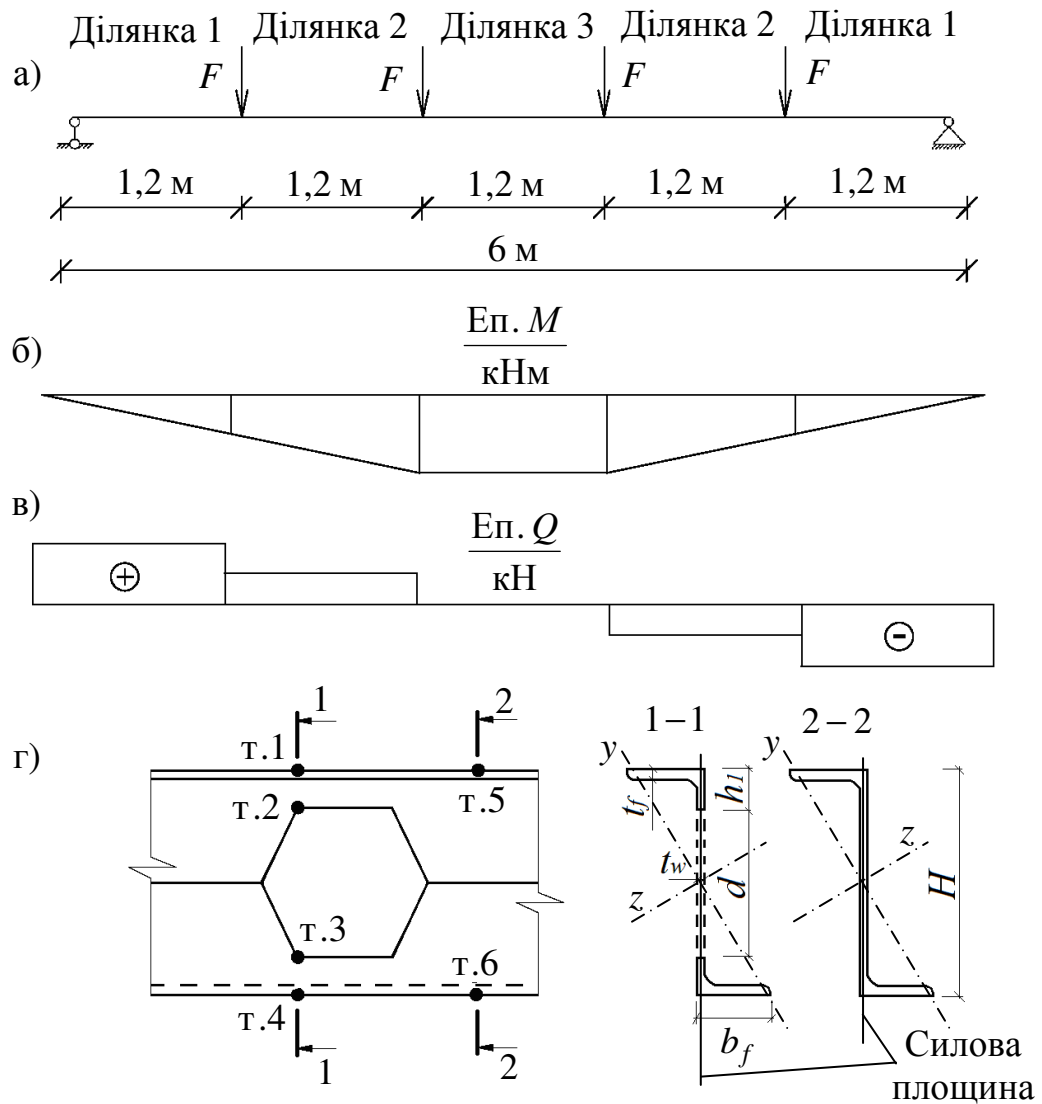


Рисунок 2.6 – Схема прогону

а – схема прикладання навантаження; б – епюра згинальних моментів;

в – епюра поперечних сил; г – розрахункові перерізи



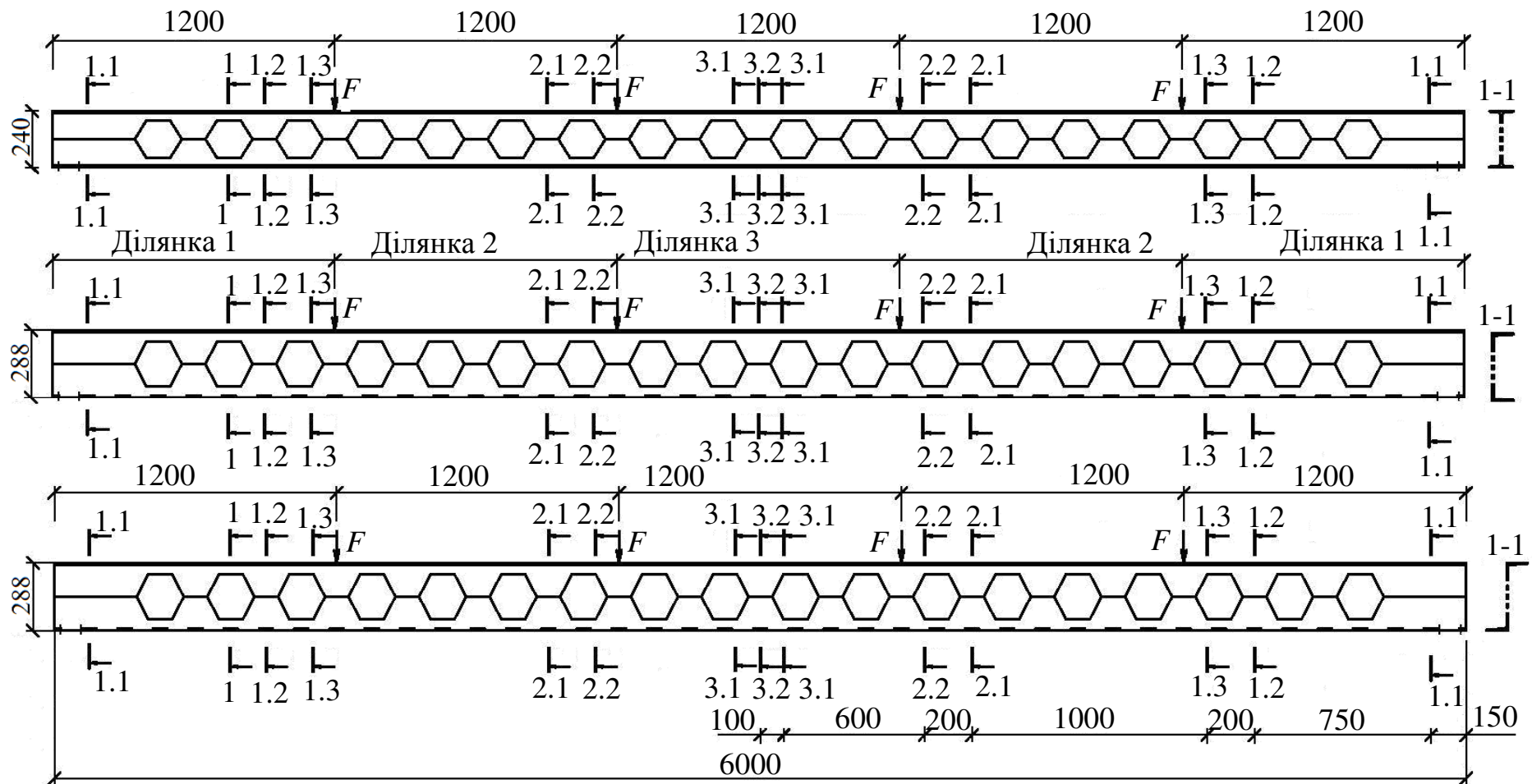


Рисунок 2.7 – Конструкції прогонів, що досліджувались

а – перфорований двотавр; б – перфорований С – подібний профіль; в – перфорований Z-подібний профіль

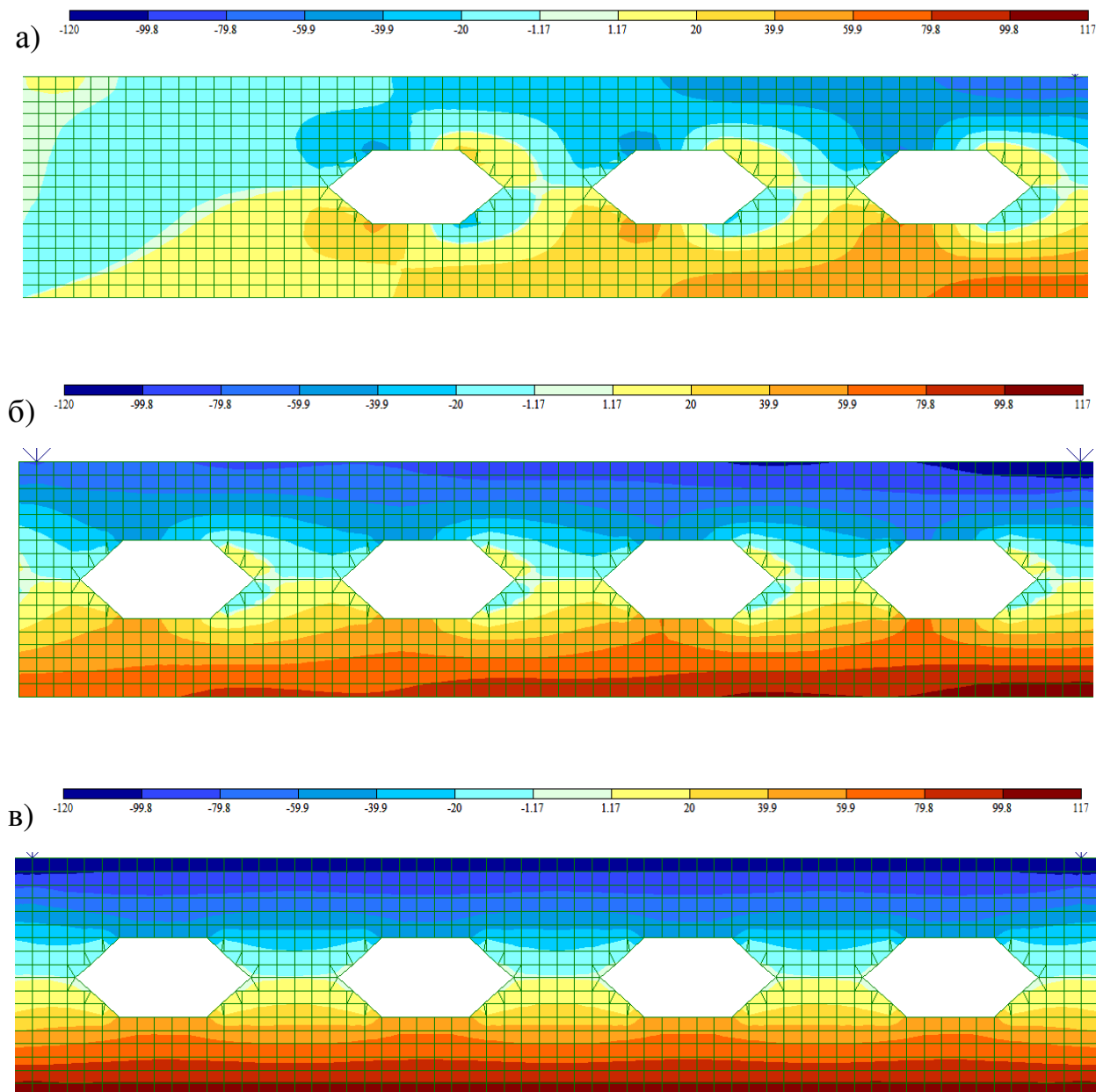


Рисунок 2.8 – Ізополя нормальних напружень  $\sigma_z$  на характерних ділянках прогону

а – ділянка 1; б – ділянка 2; в – ділянка 3

Для визначення прогинів перфорованих прогонів було використано універсальну формулу методу початкових параметрів

$$EJy = EJy_0 + EJ\theta_0 x \pm \sum \frac{M_0 (x-a)^2}{2!} \pm \sum \frac{F (x-b)^3}{3!} \pm \sum \frac{q (x-c)^4}{4!}, \quad (2.1)$$

де  $E$  – модуль пружності сталі;  $J$  – момент інерції поперечного перерізу;  $y$  – переміщення конструкції в характерній точці;  $y_0$  – переміщення конструкції в характерній точці (початковий параметр);  $a, b, c$  – відстані від початку координат до місця прикладання  $M_0, F, q$  відповідно;  $\theta_0$  – кут повороту конструкції (початковий параметр);  $x$  – відстань від початку координат до перерізу, у якому визначається прогин.

Ця формула використовується і для знаходження прогинів конструкції в умовах косого згину. У цьому випадку прогини є двоосьовими, тобто має місце прогин у площині та із площини конструкції. Сумарне переміщення обчислюється за допомогою „силового прямокутника”

$$y = \sqrt{y_z^2 + y_y^2}, \quad (2.2)$$

де  $y$  – сумарний прогин конструкції;  $y_z$  – прогин конструкції у напрямку осі  $z$ ;  $y_y$  – прогин конструкції у напрямку осі  $y$ .

### **2.3. Визначення напружено-деформованого стану перфорованого прогону Z-подібного профілю**

Згинальні елементи мають найбільшу несучу здатність, якщо напрямок дії зовнішнього навантаження збігається з площиною найбільшої жорсткості. У прогонах покриття двотаврового та С-подібного профілів, які розміщені на верхніх поясах кроквяних ферм з невеликим ухилом, така збіжність відсутня. Для Z-подібних профілів головні осі інерції розміщені під певним кутом до центральних осей перерізу і тому найбільшій несучої здатності такий переріз досягає у випадку розміщення елемента під певним кутом.

Значення величин розрахункового граничного і розрахункового експлуатаційного навантажень визначені для вихідного швелера 22У/ДСТУ 3436–96 для розрахунку відповідно за граничними станами першої і другої груп залежно від кута нахилу конструкцій без закріплення

поясів. Значення навантажень на перфорований прогон приймалися такими самими (табл. 2.2).

Для можливості виконання порівняльного аналізу теоретичних та проведених в подальшому експериментальних досліджень зразка перфорованого елемента, виконаного зі сталі класу С 440, навантаження за граничними станами І групи визначалися виходячи з її розрахункового опору  $R_y = 440 \text{ МПа}$ .

Навантаження за граничними станами ІІ групи визначались з умови розвитку максимально допустимого прогину конструкції, який для прогонів покриття прольотом 6 м становить  $1/200 l$ , тобто в даному випадку 3 см.

Таблиця 2.2 – Величини навантажень на перфорований прогон  
Z-подібного профілю залежно від кута нахилу конструкції

Кут нахилу конструкції $\alpha$ , град	0	5	10	15	20	25
Навантаження за граничними станами І-ої групи $F$ , кН	23,5	14,1	10,1	8,0	6,6	5,8
Навантаження за граничними станами ІІ-ої групи $F$ , кН	8,8	5,6	3,3	2,3	1,8	1,5

Напруження визначались для вихідного профілю (табл. 2.3) і перфорованого прогону (табл. 2.4) у розрахункових точках характерних перерізів, які розміщені найближче до прикладеного навантаження.

Як видно з табл. 2.3, розбіжність між значеннями нормальних напружень в перерізах суцільного швелера, які отримані за формулами норм проектування [115], і в програмному комплексі „Ліра” не перевищують 13%. Для перфорованого Z-подібного профілю (див. табл. 2.4) найбільша різниця напружень становить 26% в перерізі з отвором на ділянці 1 (див. рис. 2.6, г),

де має місце максимальне значення поперечної сили  $Q$  і мале значення згинаючого моменту  $M$ .

З метою визначення величини коефіцієнта розвитку перерізу, за якого виникає концентрація напружень у кутах отворів, було проведено обробку їх значень для коефіцієнтів розвитку 1,2...1,5 з кроком 0,05. Для цього на кожному кроці збільшення висоти перерізу моделювався перфорований прогон, визначалися його геометричні характеристики, а саме: момент інерції, найбільша і найменша відстань від центру ваги перерізу до точок, у яких визначалися нормальні напруження, максимальний і мінімальний моменти опору верхньої та нижньої частини послабленого отвором перерізу. Як розрахункове навантаження, яке прикладалося до конструкції, використовувалося розрахункове експлуатаційне навантаження за граничними станами II-ої групи, яке було обчислене для вихідного швелера 22У/ДСТУ 3436-96 і складало 8,8 кН. Навантаження приймалося за граничними станами II групи, оскільки деформації конструкції досягнуть граничного значення раніше, ніж напруження в розрахункових точках перерізу досягнуть значень розрахункового опору за межею текучості.

В результаті проведеної обробки отриманих даних було з'ясовано, що концентрація напружень у кутах отворів перфорованого прогону для коефіцієнтів розвитку висоти вихідного профілю до 1,3 відсутня.

Починаючи з коефіцієнта 1,35 спостерігається поява концентрації напружень у кутах отворів на ділянці 1 в точках 2 і 3 перфорованого прогону, що пояснюється зменшенням висоти верхньої та нижньої частини перерізу послабленого отвором за дії великої поперечної сили. У випадку подальшого збільшення висоти перерізу, коли коефіцієнт розвитку склав 1,5, концентрація напружень виникла і в перерізах на ділянці 2 (табл. 2.5).

Результати розрахунку перфорованого Z-подібного прогону на основі прокатного профілю 22У/ДСТУ 3436–96, для кутів нахилу  $0^\circ \dots 25^\circ$  з кроком  $5^\circ$  зведено в табл. А.1, дод. А.

Таблиця 2.3 – Напруження в характерних перерізах

вихідного профілю, якщо кут нахилу  $\alpha = 0^\circ$ 

Ділянка	Характерна точка перерізу	Напруження, які обчислено в ПК „Ліра”, МПа	Напруження, які обчислено за нормами проектування [115], МПа	Різниця напружень, %
1	2	3	4	5
1	1	76,9	88,1	12,7
	4	77,3	88,1	12,3
	5	69,3	79,2	12,5
	6	69,1	79,2	12,8
2	1	130,6	149,7	12,8
	4	131	149,7	12,5
	5	126,9	145,6	12,8
	6	127	145,6	12,8
3	1	138,5	158,5	12,6
	4	138,4	158,5	12,7
	5	138,5	158,5	12,6
	6	138,4	158,5	12,7

Таблиця 2.4 – Напруження в характерних перерізах

перфорованого прогону, якщо кут нахилу  $\alpha = 0^\circ$ 

Ділянка	Характерна точка перерізу	Напруження, які обчислено в ПК „Ліра”, МПа	Напруження, які обчислено за нормами проектування [115], МПа	Різниця напружень, %
1	2	3	4	5
1	1	53,6	72,6	26
	2	63	58,4	-7
	3	61,5	58,4	-5
	4	54,2	72,6	25
	5	55,3	67,0	17
	6	55,4	67,0	17
2	1	99,7	116,8	14
	2	59,4	56	-6
	3	58,6	56	-5
	4	100,4	116,8	16

продовження табл. 2.4

1	2	3	4	5
2	5	101,4	114,0	12
	6	101,7	114,0	12
3	1	109,6	120,8	10
	2	43,3	40,3	-7
	3	43,3	40,3	-7
	4	109,5	120,8	10
	5	110,7	120,8	8
	6	110,5	120,8	8

Таблиця 2.5 – Величини нормальних напружень в характерних точках перерізу Z-подібного профілю залежно від коефіцієнта розвитку за нормами

проектування для кута  $\alpha = 0^\circ$ 

Коефіцієнт розвитку перерізу	Ділянка	Характерна точка перерізу	Нормальне напруження $\sigma$ , МПа
1	2	3	4
1,2	1	1	82,4
		2	62,3
	2	1	126,6
		2	59,6
	3	1	128
		2	42,7
1,25	1	1	74,7
		2	66,6
	2	1	112,7
		2	63,9
	3	1	112,9
		2	45,9
1,3	1	1	79,3
		2	80
	2	1	117,8
		2	76,1
	3	1	117,3
		2	54,1
1,35	1	1	79,4
		2	91
	2	1	114,8
		2	84,8
	3	1	112,6

продовження табл. 2.5

1	2	3	4
1,35	3	2	58,9
1,4	1	1	79
		2	102,2
	2	1	112,3
		2	92,7
	3	1	109,3
		2	62,4
1,45	1	1	81,3
		2	120,1
	2	1	111,3
		2	104,2
	3	1	105,9
		2	66,2
1,5	1	1	82,1
		2	137,2
	2	1	110
		2	114,6
	3	1	103,5
		2	69

Графік зміни навантаження залежно від кута нахилу конструкції за граничними станами I групи (рис. 2.9) має чітко виражену гіперболічну залежність – значення параметрів кривої плавно зменшуються. Якщо представити це зменшення у числовому виразі, то найбільший спад відбувається при зміні кута нахилу від  $0^\circ$  до  $5^\circ$  і становить 34 %. У разі подальшого збільшення кута нахилу конструкції різниця в навантаженнях не має великих стрибків і плавно зменшується в межах 26...14 %. Різниця в значеннях напружень, визначених для граничних станів I групи для кутів нахилу  $0^\circ$  і  $5^\circ$ , відображає особливості роботи перфорованих прогонів в умовах косого згину порівняно з роботою в умовах чистого згину, які полягають у виникненні додаткових переміщень із площини конструкції.

Графік зміни розрахункового навантаження залежно від кута нахилу конструкції за граничними станами II групи практично паралельний графіку



за граничними станами I групи і також описується гіперболічною залежністю (див. рис. 2.9) Найбільша різниця в навантаженні зафіксована при зміні кута нахилу  $5^{\circ} \dots 10^{\circ}$  і становить 38%. В інших випадках різниця в навантаженнях коливається в межах 29...19%.

Якщо порівняти величини навантажень, отриманих за граничними станами I і II груп, то різниця їх значень поступово збільшується в межах 31...53% при збільшенні кута нахилу конструкції  $0^{\circ} \dots 25^{\circ}$ .

Графіки прогинів конструкцій подібні до графіків зміни навантаження за граничними станами I і II груп і графік прогину вихідного профілю паралельний графіку прогину перфорованого прогону (рис. 2.10). При зміні кута нахилу конструкції  $0^{\circ} \dots 25^{\circ}$  різниця значень прогинів зменшується в межах 30...11%. Найбільша різниця у величинах прогинів спостерігається при зміні кута нахилу від  $5^{\circ}$  до  $10^{\circ}$  і становить 36%. Це так само зумовлено збільшенням прогинів у поздовжньому і поперечному напрямках з одночасним зменшенням навантажень, що прикладаються до прогону.

Для перфорованого прогону характер прогинів такий самий – при збільшенні кута нахилу конструкції  $0^{\circ} \dots 25^{\circ}$  прогин зменшується в межах 33...14%, а найбільша різниця в значеннях відбувається при зміні кута нахилу  $5^{\circ} \dots 10^{\circ}$  і вона становить 39%.

Щодо порівняння прогинів перфорованого прогону і вихідного профілю за дії однакових навантажень і однакових кутах нахилу конструкції можна зауважити, що прогин перфорованого елемента в середньому на 40% менший за прогин вихідного прокатного профілю, оскільки жорсткість останнього менша на 33%.

Також проводилися порівняння напружень в характерних точках перерізу вихідного профілю і перфорованого прогону на ділянках 1, 2 і 3, на яких поперечна сила зменшується від опор до середини прольоту конструкції, а згинаючий момент навпаки збільшується.

Графіки зміни напружень на ділянці 1 (рис. 2.11) для вихідного профілю і перфорованого прогону є паралельними, що свідчить про однаковий характер роботи цих конструкцій. Напруження в перфорованому прогоні значно менші від напружень у вихідному профілі, оскільки геометричні характеристики останнього значно менші від розвинутого профілю. Щодо інших характерних точок, то мають місце такі значення: в точці 1 напруження в обох елементах зменшуються зі збільшенням кута нахилу конструкції, різниця значень для перфорованого прогону і вихідного прокатного профілю коливається в межах 30...37%; в точці 4 різниця 30...49%; в точці 5 різниця 20...25%; в точці 6 різниця 20...30 %.

Отже, якщо порівняти напруження в точках 1, 4, 5 і 6 (див. рис. 2.6, г), які виникають в перфорованому прогоні на ділянці 1, то вони в середньому на 25...35% менші, ніж у вихідному профілі за однакових витрат металу. Графіки нормальних напружень для ділянки 2 (рис. А.1, а, дод. А) мають подібний до ділянки 1 характер. Відсоткові відношення набувають таких значень: в точці 1 різниця 24...30%; в точці 4 різниця 23...39%; в точці 5...45%; в точці 6 різниця 56...64%. Загалом, для ділянки 2, де має місце поперечний згин з порівняно великими значеннями поперечної сили і згинаючого моменту, напруження у перфорованому прогоні на 37...45% менші ніж у вихідному профілі.

На ділянці 3 (рис. А.1, б, дод. А), де виникає чистий згин, різниці напружень у характерних точках становлять: в точці 1 – 21...27%; в точці 4 – 21...36%; в точці 5 – 20...26%; в точці 6 – 20...37%. У підсумку напруження в перфорованому прогоні на ділянці 3 в середньому на 21...32% менші від напружень у вихідному профілі.

На рис. 2.12 і 2.13 наведено графіки нормальних напружень по осі Z для вихідного швелера і перфорованого прогону Z-подібного профілю. Порівнювалися напруження в характерних точках перерізу для усіх ділянок конструкції, наприклад, залежність напружень в точці 1 від кута нахилу

конструкції на трьох ділянках. Це дало змогу окремо проаналізувати роботу ділянок прогону і виявити різницю напружень на них.

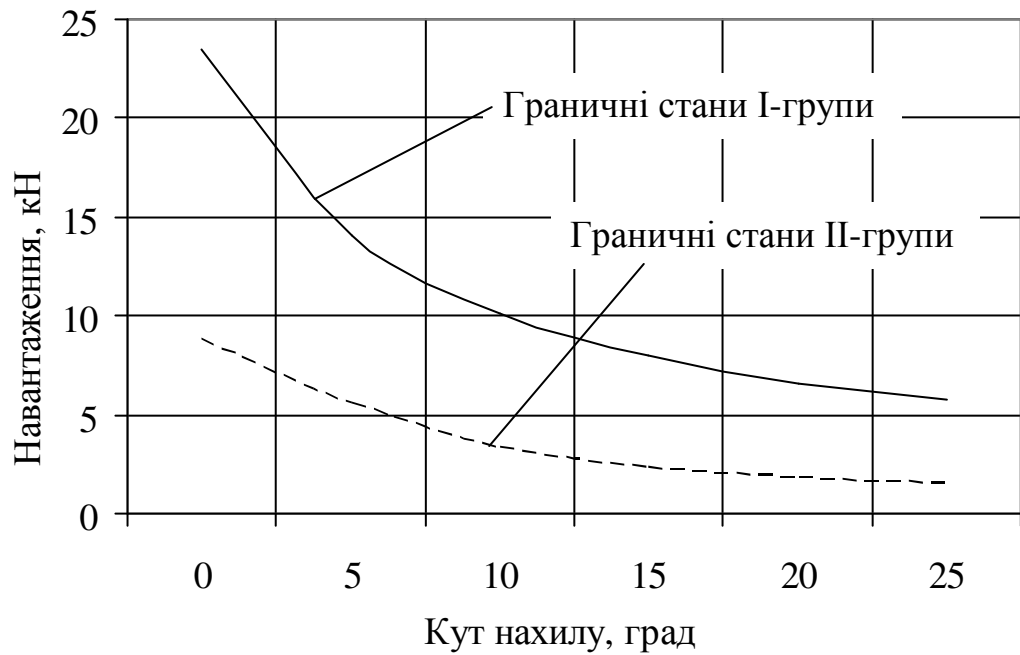


Рисунок 2.9 – Зовнішнє навантаження вихідного профілю залежно від кута нахилу конструкції

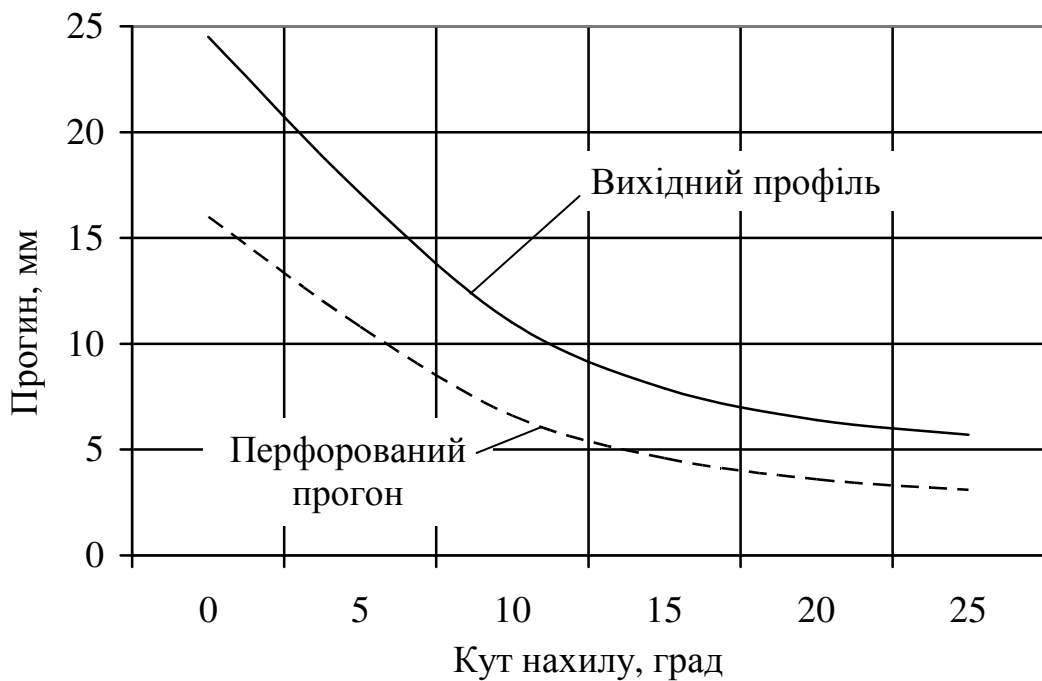


Рисунок 2.10 – Прогини вихідного профілю і перфорованого прогону залежно від кута нахилу конструкції

Найбільші напруження в точках для обох видів прогонів спостерігаються на ділянці 3, що зумовлено наявністю максимального згинаючого моменту в середині прольоту конструкції. Але для перфорованого прогону ця ділянка є менш напруженою порівняно із вихідним профілем, оскільки має місце чистий згин і відсутня концентрація напружень у кутах отворів.

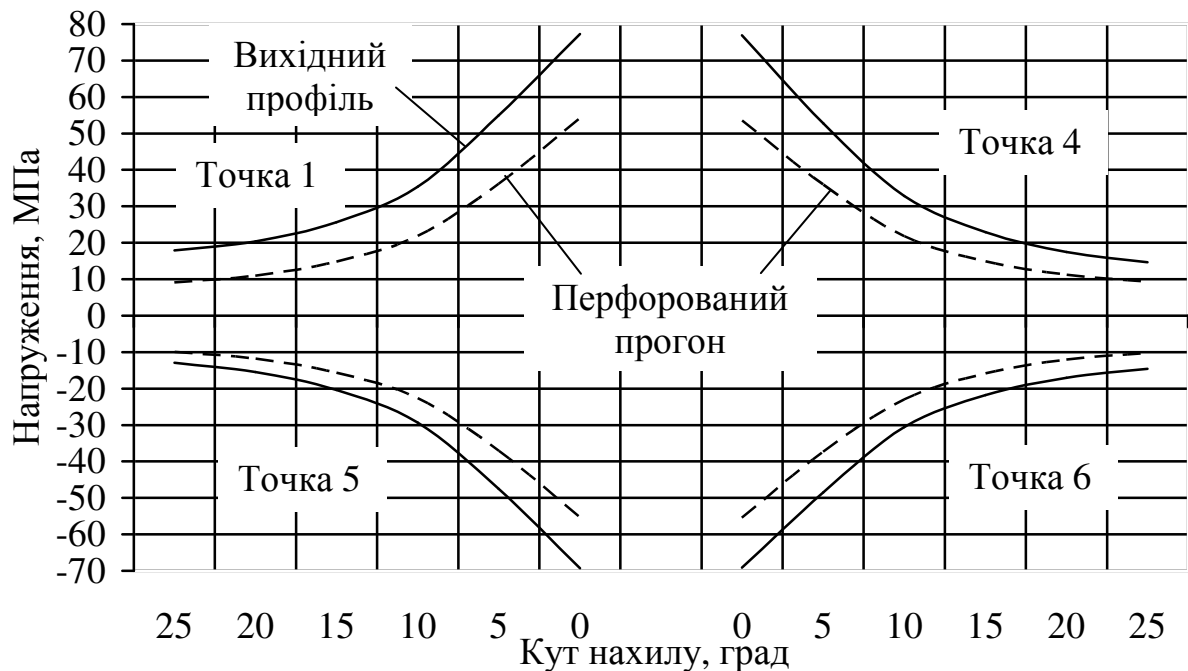


Рисунок 2.11 – Нормальні напруження залежно від кута нахилу конструкції перфорованого прогону і вихідного профілю у характерних перерізах на ділянці 1

У числовому вигляді різниця напружень для вихідного швелера має такі значення:

1) Точка 1 – напруження на ділянці 3 на 6% більше за напруження на ділянці 2 і на 44...46% більше за напруження на ділянці 1.

2) Точка 4 – напруження на ділянці 3 на 4...5% більше за напруження на ділянці 2 і на 43...44% більше за напруження на ділянці 1.

3) Точка 5 – напруження на ділянці 3 на 8...9% більше за напруження на ділянці 2 і на 50...52% більше за напруження на ділянці 1.

4) Точка 6 – напруження на ділянці 3 на 8% більше за напруження на ділянці 2 і на 50...54% більше за напруження на ділянці 1.

З наведених результатів обчислень можна зробити висновок, що напруження на ділянці 3 в суцільному прогоні в середньому на 6 % більші за напруження на ділянці 2 і в середньому на 47 % більші, ніж на ділянці 1.

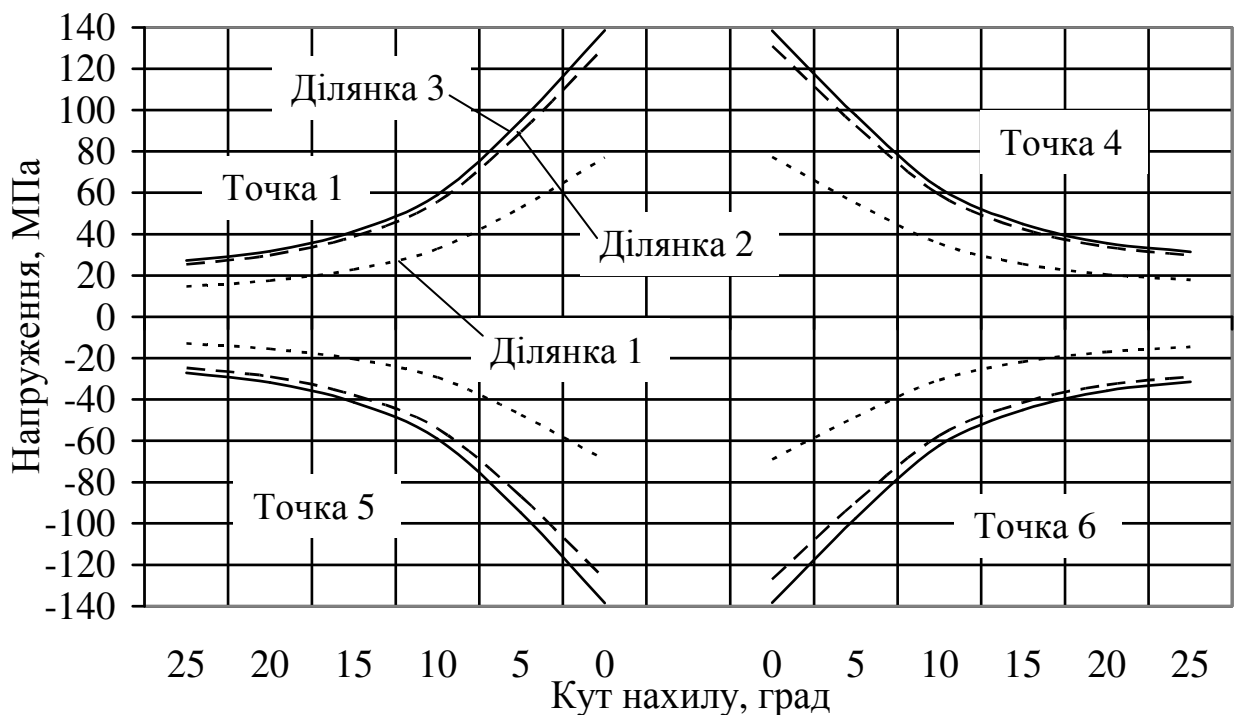


Рисунок 2.12 – Нормальні напруження залежно від кута нахилу конструкції вихідного профілю у характерних перерізах

Проаналізувавши напруження для перфорованого прогону, отримано такі значення різниць напружень в характерних точках перерізу:

1) Точка 1 – напруження на ділянці 3 на 9...10% більше за напруження на ділянці 2 і на 51...53% більше за напруження на ділянці 1.

2) Точка 2 – напруження на ділянці 2 на 4...6% більше за напруження на ділянці 1 і на 31...33% більше за напруження на ділянці 3.

3) Точка 3 – напруження на ділянці 2 на 2...5% більше за напруження на ділянці 1 і на 29...30% більше за напруження на ділянці 3.

4) Точка 4 – напруження на ділянці 3 на 8...10% більше за напруження на ділянці 2 і на 51...55% більше за напруження на ділянці 1.

5) Точка 5 – напруження на ділянці 3 на 8...10% більше за напруження на ділянці 2 і на 50...51% більше за напруження на ділянці 1.

6) Точка 6 – напруження на ділянці 3 на 8...10% більше за напруження на ділянці 2 і на 49...50% більше за напруження на ділянці 1.

Отже, напруження на ділянці 3 в перфорованому прогоні в середньому на 6 % більші, ніж на ділянці 2 і в середньому на 43 % більші, ніж на ділянці 1.

Для дослідження зміни нормальних напружень в характерних точках перерізів перфорованого прогону Z-подібного профілю залежно від зміни коефіцієнту розвитку вихідного профілю проводилося моделювання конструкцій з подальшим занесенням результатів обчислень у табл. А.3, дод. А і представленням цих результатів у вигляді епюр нормальних напружень у характерних перерізах перфорованого профілю (табл. А.2, дод. А).

Оскільки несуча здатність елементів залежить не лише від кута нахилу конструкції, а і від форми поперечного перерізу самого елемента, то в роботі також проводився аналіз величин зовнішніх навантажень, визначених за граничними станами II-ої групи, які можуть сприйняти двотавр, С- і Z-подібні профілі з коефіцієнтом розвитку вихідного профілю 1,2 (табл. 2.6). З рис. 2.14 видно, що графік зміни зовнішнього навантаження від кута нахилу конструкції має однаковий характер для усіх видів перерізу, що свідчить про те, що основним параметром при визначенні зовнішнього навантаження є кут нахилу конструкції.

Значення нормальних напружень в перфорованих елементах з різною конфігурацією перерізу в характерних точках на трьох розрахункових ділянках наведено в табл. А.4, дод. А .

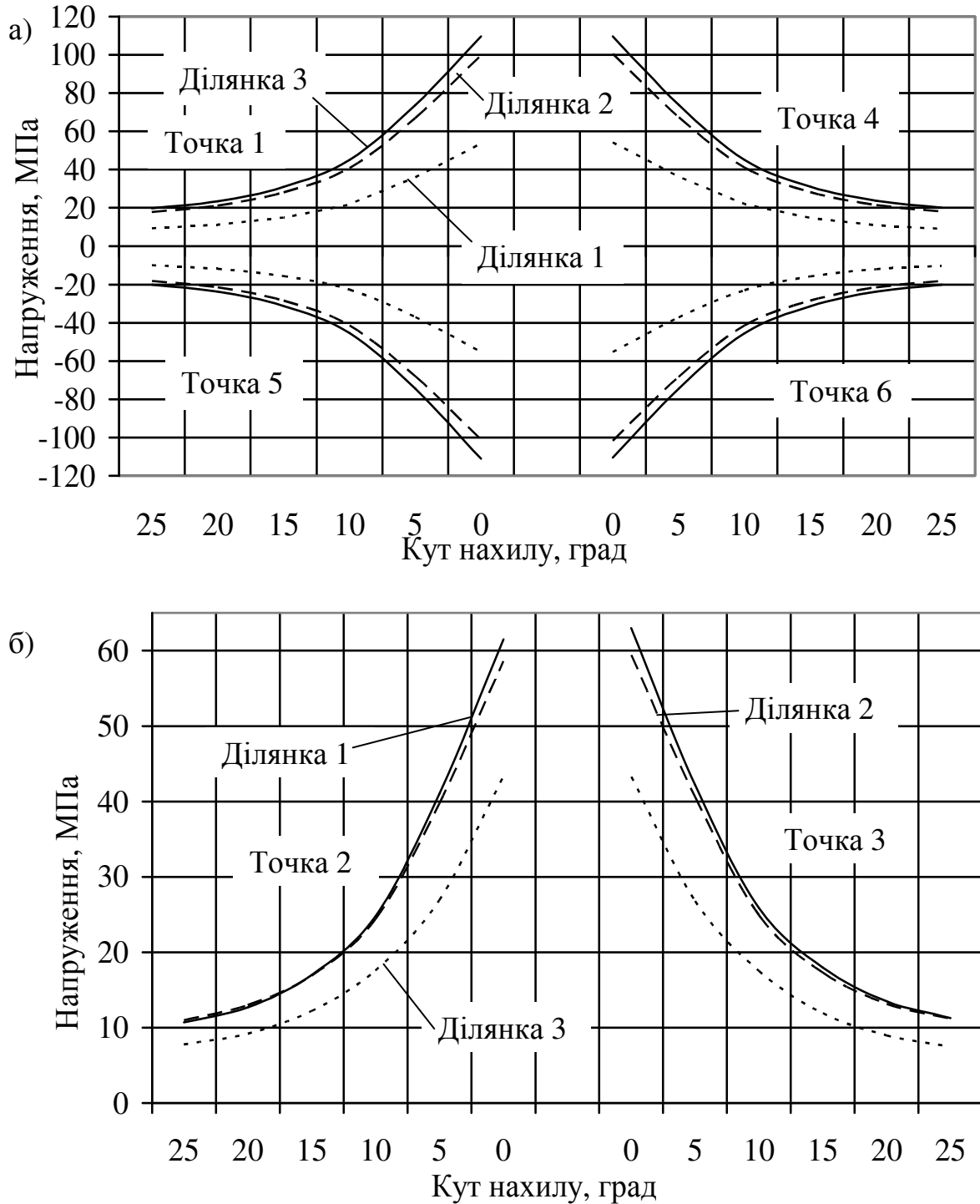


Рисунок 2.13 – Нормальні напруження залежно від кута нахилу конструкції перфорованого прогону у характерних перерізах

а – точки 1, 4, 5, 6; б – точки 2 і 3

Таблиця 2.6 – Несуча здатність перфорованих профілів різної конфігурації за граничними станами II-ої групи

Кут нахилу, град	Тип перерізу і навантаження, кН		
	Z-подібний профіль	C-подібний профіль	Двотавровий профіль
0	13,1	8,8	15,4
5	9,9	5,6	7,9
10	6,6	3,3	4,5
15	4,8	2,3	3,1
20	3,7	1,8	2,3
25	3,0	1,5	1,9

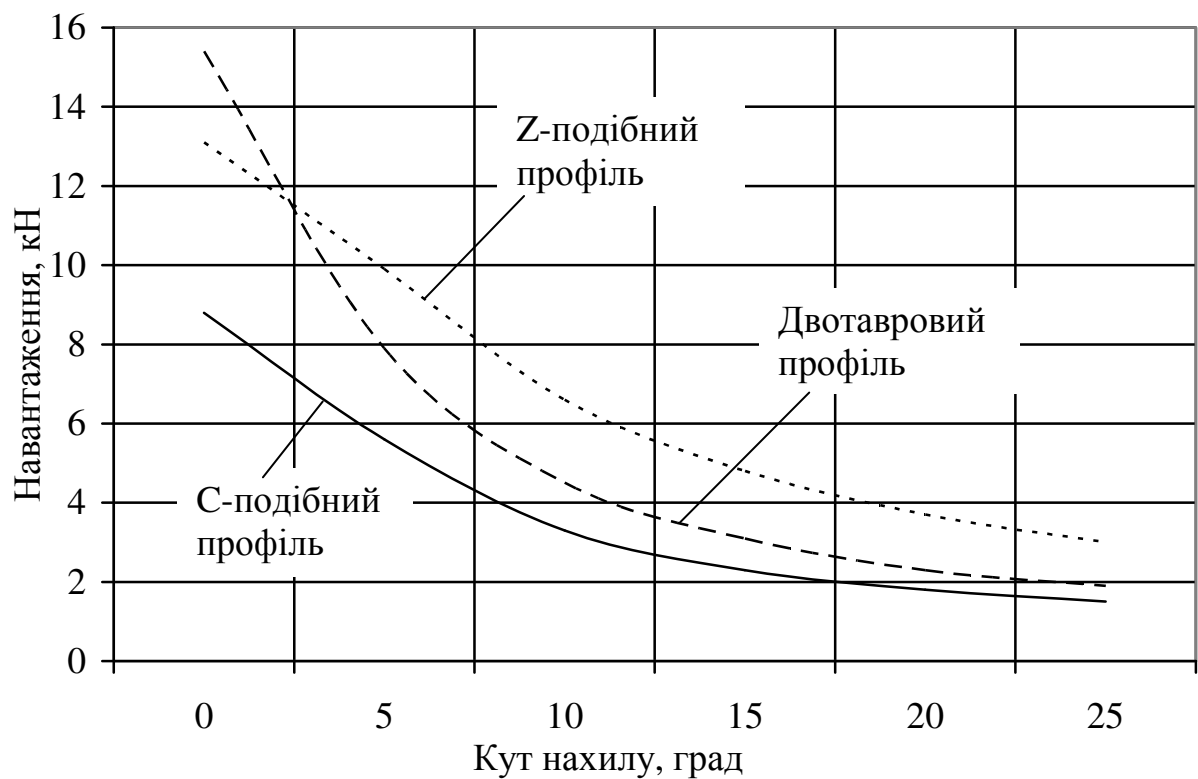


Рисунок 2.14 – Несучі здатності перфорованих двотавра, C- і Z-подібних профілів

## 2.4. Висновки до розділу 2

1) Встановлено можливість використання методу скінчених елементів, реалізованого в програмному комплексі „Ліра”, для визначення напружень в характерних перерізах перфорованих профілів різного типу про що свідчить



задовільний збіг результатів обчислень за нормами проектування [115] і МСЕ для кута нахилу  $0^\circ$ .

2) Встановлено характер зміни напружено-деформованого стану перфорованих профілів в характерних точках перерізів залежно від кута нахилу покрівлі в межах  $0^\circ \dots 25^\circ$  на 3-х розрахункових ділянках по довжині прогону.

3) Розбіжність між результатами обчислень за нормами проектування [115] і МСЕ на 1-й, 2-й і 3-й розрахункових ділянках становить відповідно 21 %, 13 % і 9 %, що свідчить про необхідність корегування формул зазначених норм для обчислення напружень в характерних точках перерізів особливо на ділянці 1, де має місце велика поперечна сила і малий згинаючий момент.

4) Зміна величини напружень в характерних точках розрахункових перерізів залежно від кута нахилу покрівлі описується залежністю, що наближається до гіперболічної.

5) Встановлено, що концентрація напружень в кутах отворів спостерігається, починаючи з величини коефіцієнта розвитку перерізу 1,35 і до 1,5, а до цього концентрація напружень відсутня для будь-якого кута нахилу прогону в межах від  $0^\circ$  до  $25^\circ$  і для будь-якої розрахункової ділянки по довжині прогону.

6) На підставі виконаних обчислень для подальших експериментальних досліджень запропоновано конструкцію перфорованого прогону Z-подібного профілю, виконаного з прокатного швелера і законструйованого відповідно до рекомендацій [91, 92], який має найбільшу несучу здатність порівняно з двотавровим і С-подібним профілями.

7) Матеріали, представлені в розділі, опубліковані автором в [95, 102, 105].

### **РОЗДІЛ 3.**

#### **Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану перфорованого прогону в умовах косого згину**

##### **3.1. Мета та задачі експериментальних досліджень**

Основною метою експериментальних досліджень є встановлення дійсного напружено-деформованого стану перфорованого прогону Z- подібного профілю у характерних перерізах на різних ділянках за різних кутів його нахилу та визначення величини несучої здатності запропонованої конструкції за раціонального кута нахилу конструкції.

Виходячи з зазначеної мети, задачами експериментальних досліджень є:

1) запроектувати та виготовити перфорований Z-подібний прогон у натуральну величину прольотом 6 м;

2) розробити та запроектувати експериментальну установку для дослідження перфорованого Z-подібного прогону за різних кутів нахилу конструкції, яка дозволить закріпити досліджуваний елемент відповідно до його реальних умов роботи, а також виконати його розкріплення із площини дії навантаження;

3) встановити фактичні значення напружень і прогинів у характерних перерізах перфорованого прогону, які виникають за різних кутів нахилу конструкції;

4) провести порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень з результатами розрахунків, отриманими за існуючими нормами проектування та теоретичними розрахунками в ПК „Ліра”;

5) встановити граничну несучу здатність перфорованого Z-подібного прогону, виготовленого з прокатного швелера №22У/ДСТУ 3436–96, за раціонального кута його нахилу, а також форму та характер руйнування конструкції.

### 3.2. Конструкція дослідного зразка та його виготовлення

Оскільки дійсний напружено-деформований стан конструкції може суттєво відрізнятися від результатів теоретичних розрахунків, що виконуються для ідеалізованих схем, було вирішено провести самостійні експериментальні дослідження розробленої конструкції перфорованого Z-подібного прогону в умовах косого згину.

Основною метою цих досліджень є встановлення дійсного напружено-деформованого стану перфорованого прогону Z-подібного профілю, виготовленого на основі прокатного швелера, у найбільш характерних перерізах по його довжині в умовах косого згину у діапазоні кутів нахилу покрівлі  $0^\circ \dots 25^\circ$ , що найчастіше використовуються як для будівель промислового призначення, так і для громадських будівель.

Для реалізації зазначеної мети досліджень у науково-дослідній лабораторії кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд Національного університету водного господарства та природокористування (НУВГП) було проведено натурні експериментальні дослідження конструкції прогону Z-подібного профілю довжиною 6 м (рис. 3.1).

Запропонована конструкція виготовлена з прокатного швелера №22У/ДСТУ 3436–96, стінка якого була розрізана за зигзагоподібною лінією і в подальшому зварена зі зсувом і поворотом однієї половини швелера навколо своєї осі, що дозволило утворити перфорований прогон Z-подібного профілю. Для забезпечення вимог повного проварювання швів по всій довжині елемента проводився візуальний контроль їх якості. Коефіцієнт розвитку висоти профілю склав 1,2, що дозволило збільшити висоту перерізу на 20%.

Для визначення фактичних механічних характеристик сталі було виготовлено стандартні зразки матеріалу дослідної конструкції з полиці і

стілки вихідного швелера. Всі дослідження фізичних характеристик проводилися у науково-дослідній лабораторії (НУВГП) у розривній машині „УММ-50”. Зразки було закріплено в затискачах машини, до яких прикладалось навантаження ступенями зі швидкістю 20 МПа/с до повного руйнування. Під час випробування розривною машиною було побудовано діаграми розтягу, які дозволили визначити механічні характеристики матеріалу. Результати досліджень наведено у табл. 3.1

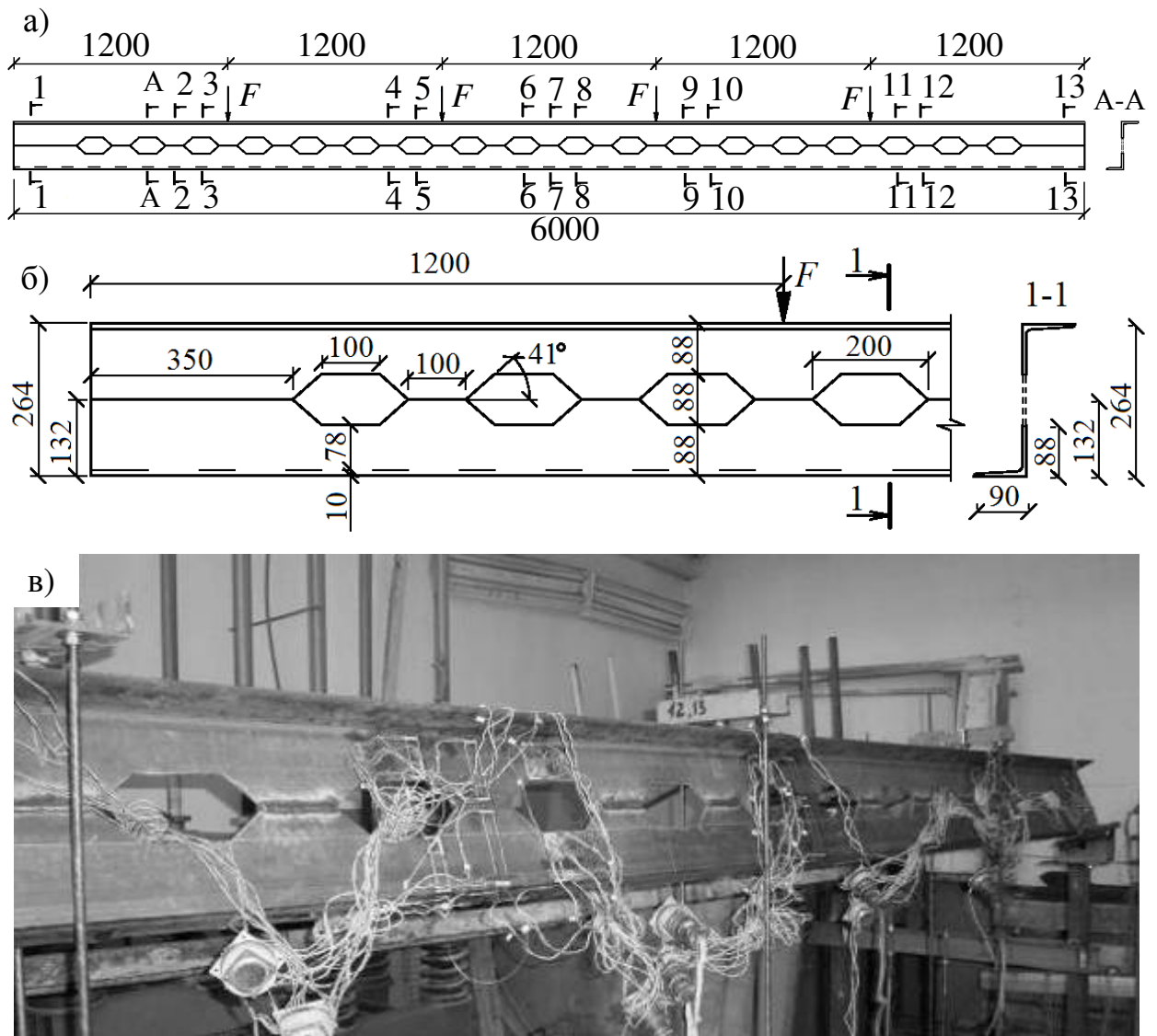


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд дослідної конструкції перфорованого прогону прольотом 6 м

а – зовнішній вигляд; б – геометричні розміри; в – виготовлена конструкція

Таблиця 3.1 – Механічні характеристики зразків елементів перфорованого прогону

Профіль	Швелер №22У/ДСТУ 3436–96	
	полиця	стінка
Марка сталі	C440	C440
Межа текучості $R_y$ , МПа	443	448
Межа міцності $R_u$ , МПа	574	583

### 3.3. Прилади для вимірювання напружень і деформацій

Для експериментальних досліджень конструкції перфорованого прогону використовувалися стандартні прилади двох типів: для вимірювання деформацій волокон матеріалу – електротензорезистори; для вимірювання переміщень – прогиноміри „6 ПАО-ЛИСИ” з ціною поділки 0,01 мм, які разом дозволили зафіксувати напружено-деформований стан у повному обсязі.

Для вимірювання деформацій матеріалу використовувалися тензорезистори з базою 20 мм, які підключалися до вимірювача деформацій „СИИТ-3” за допомогою електричних дротів, який і фіксував покази датчиків. У свою чергу вимірювач деформацій передавав дані на комп’ютер через блок, який перетворює аналоговий сингал у цифровий (рис. 3.2). Всього було використано 128 датчиків розміщених у 13 перерізах по довжині прогону (див. рис. 3.1, а), що дало змогу контролювати симетричність деформацій у відповідних перерізах прогону. Тензорезистори попередньо проходили тарування на спеціальній тарувальній балочці для подальшого переведення деформацій волокон матеріалу у нормальні напруження. Було встановлено ціну поділки приладу, яка склала 0,169 МПа. Сам принцип роботи тензометричних датчиків полягає у використанні залежності між деформацією та омічним опором.

Розміщення тензорезисторів проводилося у характерних перерізах конструкції, а саме: у перерізах з отвором – симетрично відносно поздовжньої осі на стінці та обох поличках швелера; у перерізі без отвору – на стінці та поличках; на приопорній ділянці – на стінці та поличках (рис. 3.3).



Рисунок 3.2 – Апаратура для вимірювання деформацій волокон з блоком-перетворювачем

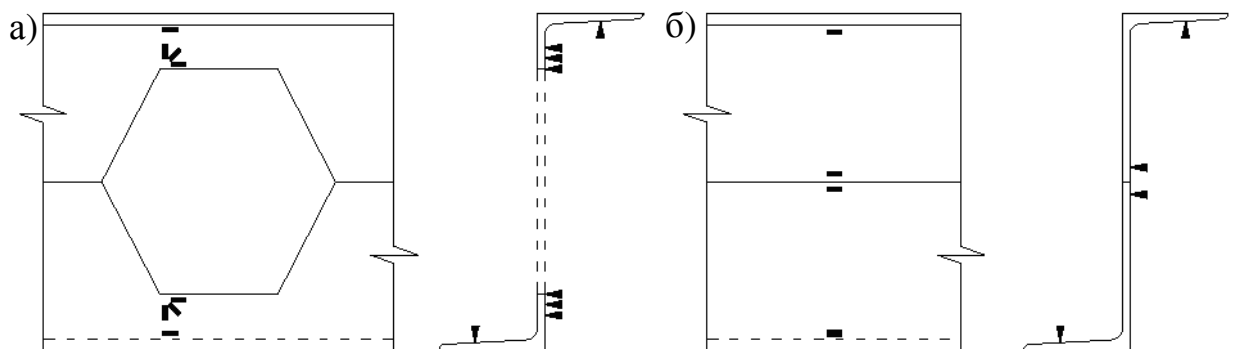


Рисунок 3.3 – Схема розміщення тензорезисторів у характерних перерізах перфорованого прогону

а – в перерізі з отвором; б – в перерізі без отвору

Для уточнення напрямку головних напружень у кутах отворів були влаштовані розетки з трьох тензодатчиків (рис. 3.4). Їх бази були орієнтовані згідно з напрямком деформацій у волокнах матеріалу.

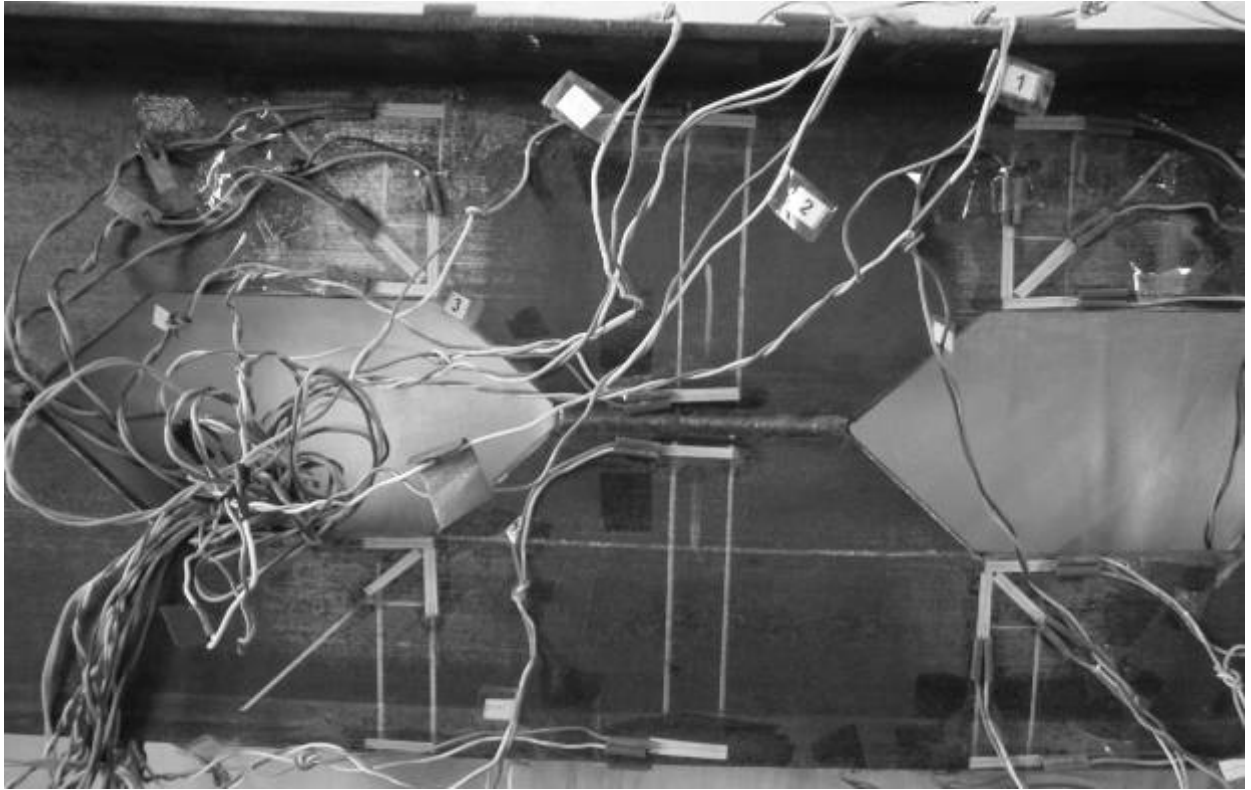


Рисунок 3.4 – Розміщення тензорезисторів на дослідній конструкції

Нормальні напруження в перерізах перфорованого прогону Z-подібного перерізу вимірювалися на чотирьох ділянках (див. рис. 2.6, а, б, в):

- 1) ділянка з максимальною поперечною силою і малим згинаючим моментом;
- 2) ділянка з середніми значеннями поперечної сили і згинаючого моменту;
- 3) ділянка з максимальним згинаючим моментом за відсутності поперечної сили;
- 4) приопорні ділянки.

На кожній з трьох характерних ділянок (крім приопорних) можна виділити два характерні перерізи, в яких і визначалися напруження: переріз з

отвором і переріз без отвору. Всі вони знаходяться поблизу точок прикладання зовнішнього зосередженого навантаження (див. рис. 3.1, а).

Прогиноміри розміщувалися в місцях найбільших імовірних деформацій, тобто посередині прольоту балки (рис. 3.5).

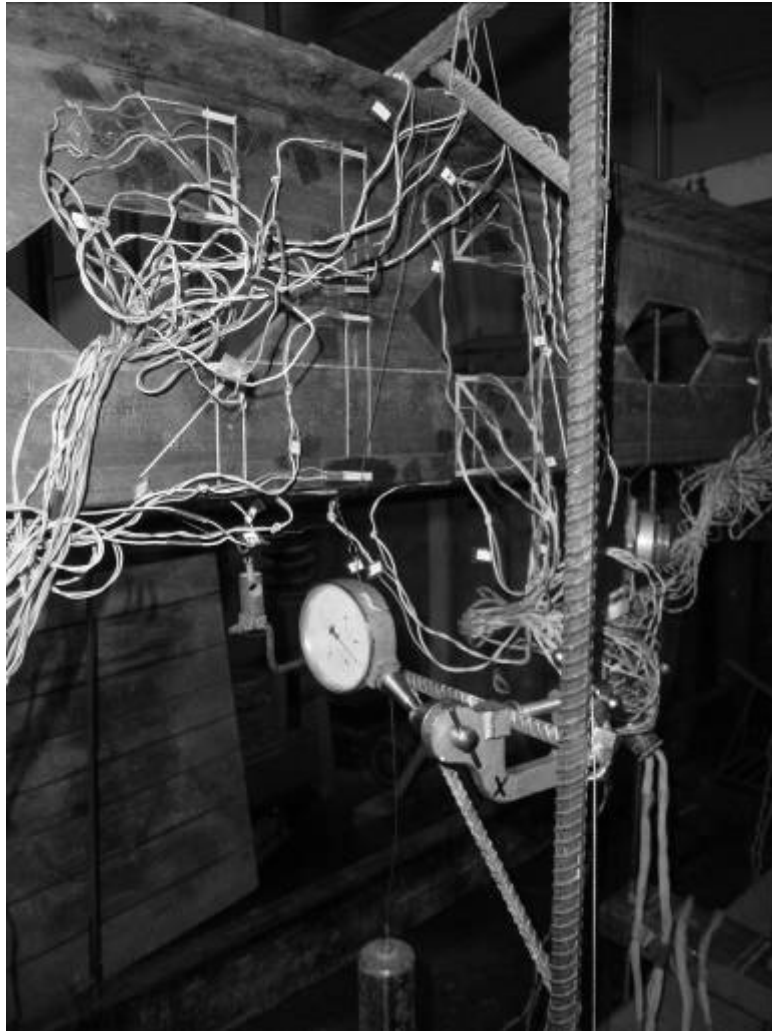


Рисунок 3.5 – Розміщення прогиномірів

### **3.4. Експериментальна установка та обладнання**

Для дослідження згинальних елементів, визначення їх дійсної роботи та напружено-деформованого стану в науково-дослідній лабораторії НУВГП було запроектовано і виготовлено спеціальну експериментальну установку



(рис. 3.6), яка дозволяє проводити випробування конструкцій прольотом до 6 м.

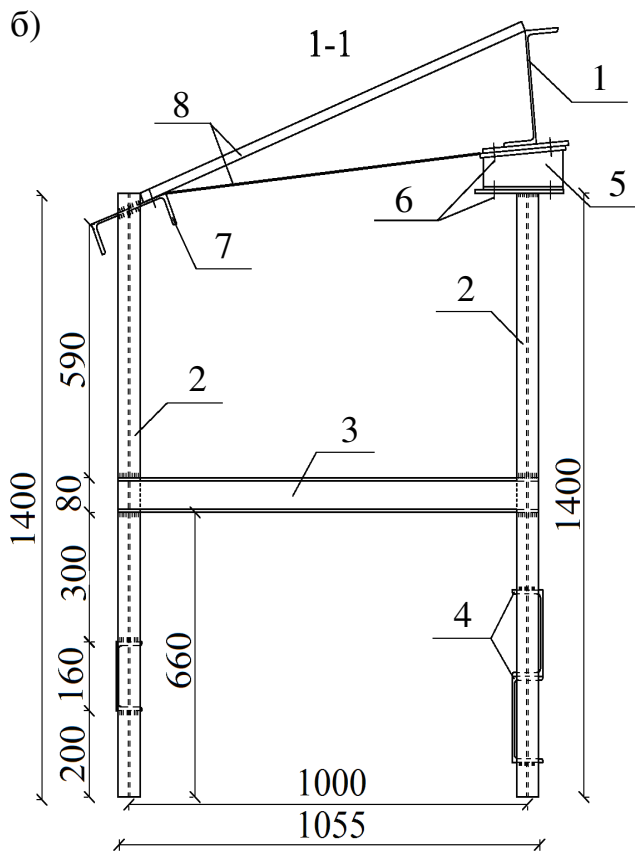
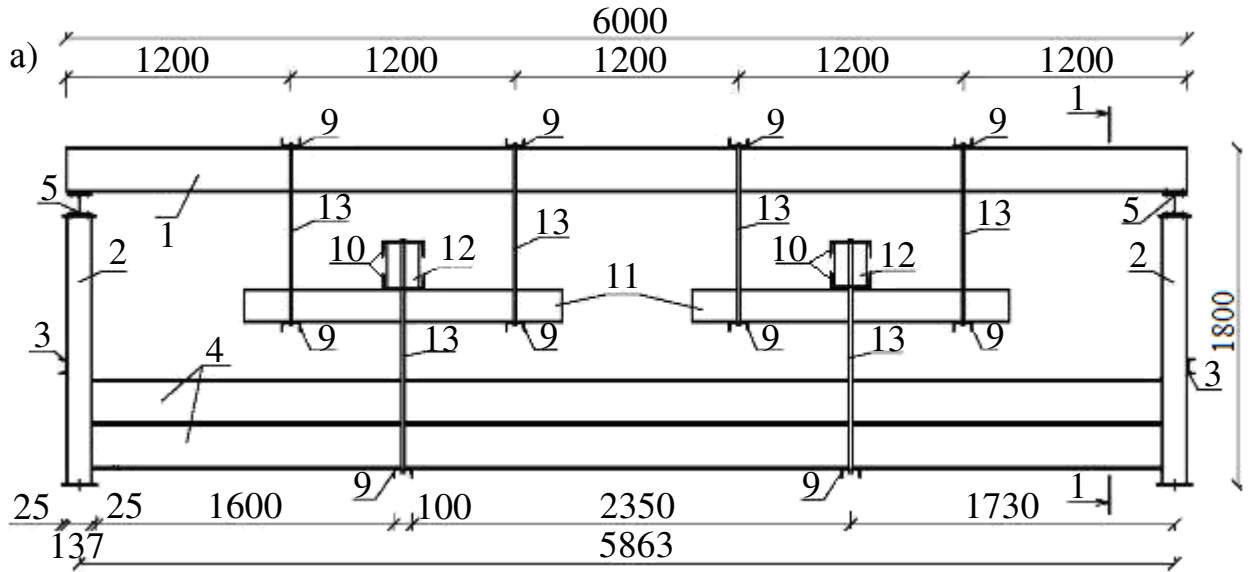


Рисунок 3.6 – Загальна схема експериментальної установки

а – у поздовжньому напрямку;

б – у поперечному напрямку;

1 – дослідна конструкція;

2 – опорний стояк; 3 – в'язеві елементи; 4 – силова підлога;

5 – система зміни кута нахилу конструкції; 6 – болти кріплення;

7 – елемент, що моделює існуючий прогон покрівлі;

8 – поперечні в'язі; 9, 10 – опорні балочки; 11 – траверси;

12 – домкрати; 13 – тяги

До складу експериментального обладнання входять система закріплення дослідної конструкції; система створення навантаження; система передачі навантаження на конструкцію; система зміни кута нахилу дослідної конструкції відповідно до ухилу покрівлі і система контролю за станом конструкції.

Система закріплення дослідного прогону в експериментальній установці представляє собою дві плоскі рами, які за допомогою в'язевих елементів утворюють жорстку просторову конструкцію, що забезпечує її стійкість під час прикладання навантаження (рис. 3.7). Основними елементами системи закріплення є опорні стояки, виготовлені з двотаврів 14Б1/ГОСТ 26020–83, і в'язеві елементи, виготовлені зі швелерів 8У/ДСТУ 3436–96.



Рисунок 3.7 – Дослідна установка (вигляд збоку)

Одна з рам призначена для закріплення дослідної конструкції в проектному положенні і передачі на неї зовнішнього навантаження від

системи передачі навантаження, а інша – дає змогу розкріпити дослідну конструкцію з її площини. Для цього використовуються рівнополицеві кутики 50x50x5/ДСТУ 2251–93, які розміщуються з кроком 1,2 м і моделюють закріплення верхнього поясу дослідної конструкції з її площини панелями типу „сендвич”, а також арматурні стержні діаметром 20 мм по нижньому поясу прогону для моделювання розпірок (рис. 3.8).

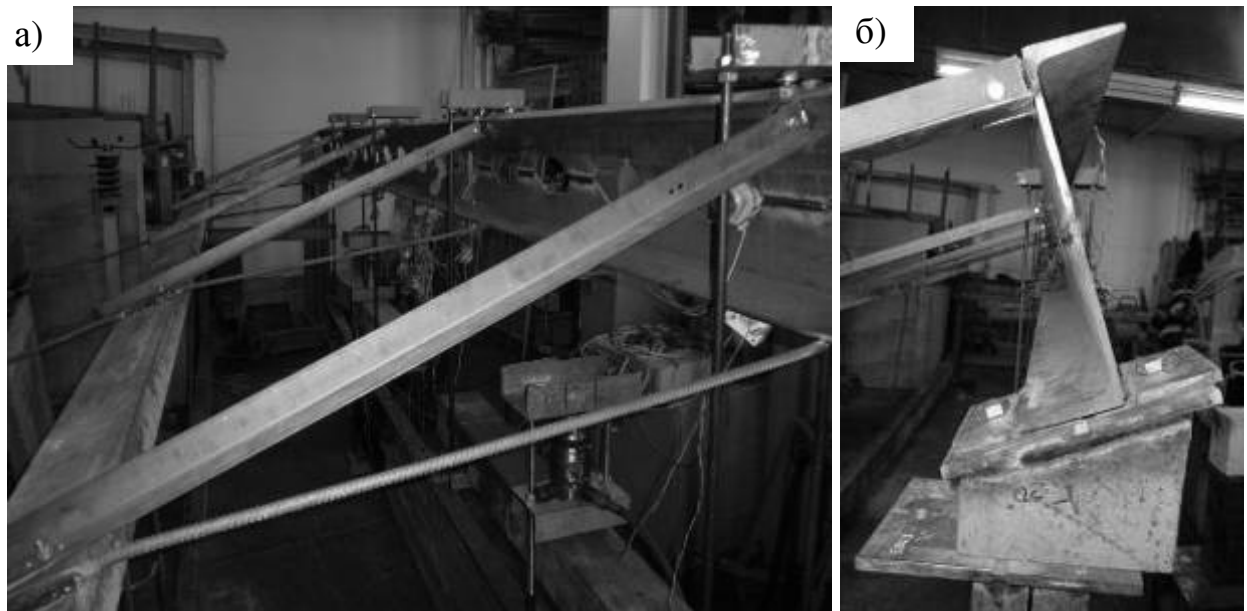


Рисунок 3.8 – Закріплення з площини дії навантаження  
а – поперечні в’язі; б – вузол кріплення в’язі до прогону

Систему зміни кута нахилу дослідної конструкції представлено у вигляді „башмаків”, які передають навантаження від дослідної конструкції на раму установки і забезпечують необхідний кут нахилу конструкції. Вони виготовлені з двох швелерів, стінки яких зрізані під певним кутом для забезпечення проектного положення конструкції. До полиці швелера приварено металеву пластину товщиною 10 мм. Для надійного кріплення конструкції до експериментальної установки в „башмаках” було виконано чотири отвори під болти діаметром 16 мм (рис. 3.9).

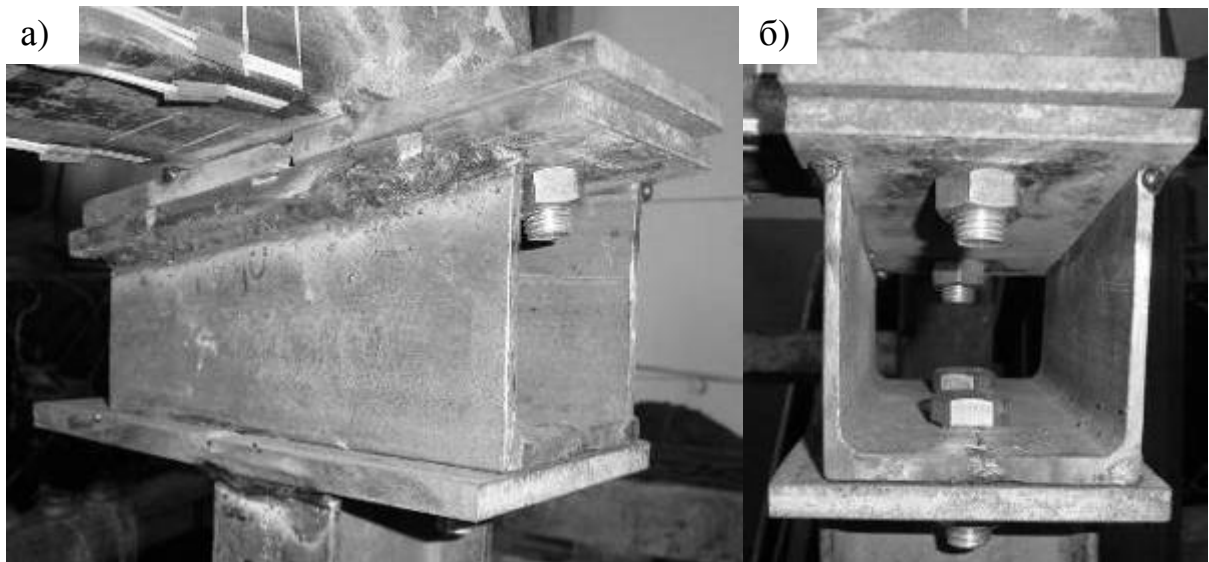


Рисунок 3.9 – Конструкція „башмаків”

а – вигляд збоку; б – вигляд спереду

Система передачі навантаження складається з певного числа траверс та тяг, за допомогою яких навантаження від домкратів через опорні балочки передається на верхній пояс дослідної конструкції, при цьому анкери закріплюються за силову підлогу (рис. 3.10, а). Вона в свою чергу запроектована з двох прокатних швелерів 24У/ДСТУ 3436–96, які встановлено один на другий зверху і зварено по довжині. Це дозволило значно збільшити жорсткість силовій підлозі, яка сприймає розрахункове навантаження без суттєвих деформацій, оскільки її жорсткість у вертикальній площині у 4,5 рази більша за жорсткість дослідної конструкції. Швелери силовій підлозі за допомогою зварювання жорстко з'єднані з опорними стояками. Навантаження на дослідний зразок прикладається до верхнього поясу у місцях можливого кріплення панелей „сендвич”, а саме у чотирьох точках на всьому прольоті конструкції, які рівновіддалені одна від одної і двох опорних вузлів на 1,2 м (див. рис. 3.1, а). Для досягнення точкового прикладання навантаження до конструкції перфорованого прогону використовувалися сталеві кульки, які були зафіксовані у спеціальних тримачах – у даному випадку в гайках (рис. 3.11).

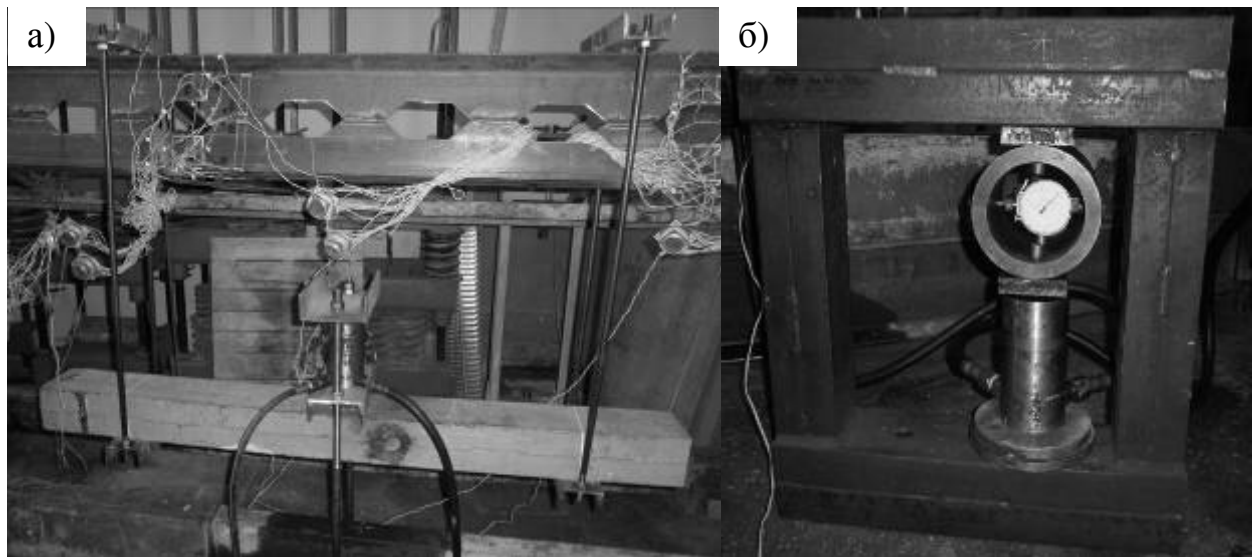


Рисунок 3.10 – Система передачі навантаження  
а – загальний вигляд; б – контрольний домкрат з динамометром

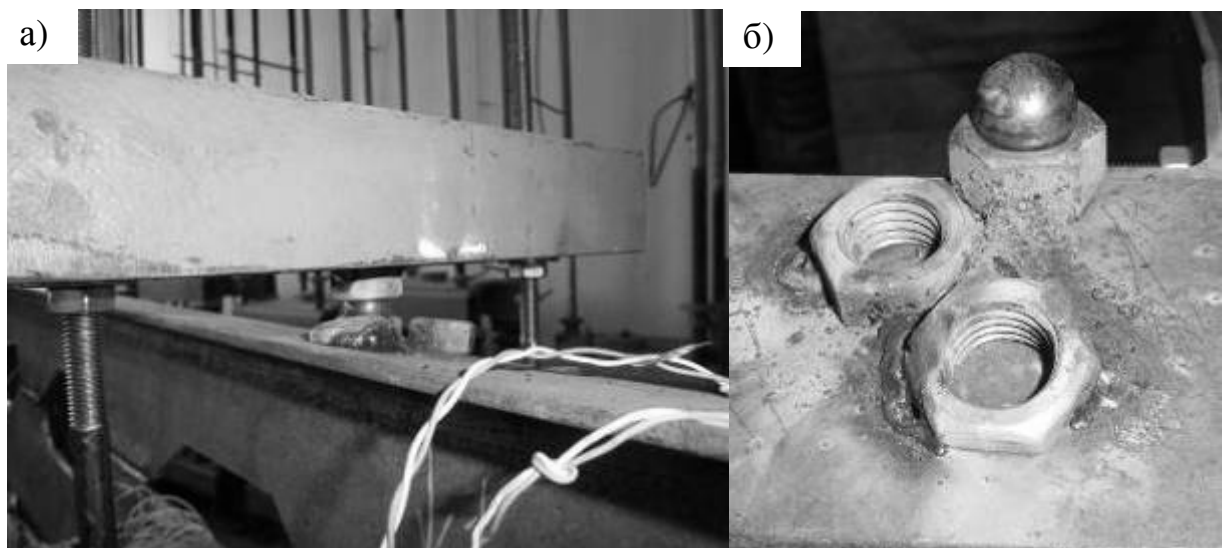


Рисунок 3.11– Вузол точкового прикладання зовнішнього навантаження до  
конструкції прогону

а – зовнішній вигляд; б – фіксатори сталеві кульки

Система створення навантаження складається з маслостанції з манометром та трьох послідовно з'єднаних домкратів, кожен з яких може розвинути навантаження до 10 т. Домкрати з'єднані між собою маслопроводами і під'єднанні до маслостанції. Для контролю величини

навантаження використовувався динамометр типу „ДОСМ – 10” з максимальним зусиллям 10 т. Він був протарований в універсальній машині „УММ – 50” в науково-дослідній лабораторії НУВГП.

Система контролю напружено-деформованого стану конструкції складається з апаратури для вимірювання фібрових деформацій елементів за допомогою контактних електротензорезисторів, прогиномірів для вимірювання вертикальних і горизонтальних деформацій у площині та із площини дії навантаження, розміщених у місцях імовірного виникнення найбільших деформацій.

### **3.5. Методика проведення експериментальних досліджень**

Випробування конструкцій бувають двох видів: експериментальні, під час проведення яких фактична міцність і деформативність конструкції порівнюються з розрахунковими, і вибіркові, які проводяться для з’ясування відповідності фактичної міцності і деформативності аналогічним проектним характеристикам [60, 107].

В даній роботі випробування дослідної конструкції перфорованого прогону Z-подібного профілю проводилися на спеціально розробленій установці за допомогою гідравлічних домкратів та системи тяг.

Випробування конструкції проводилося за симетричною схемою навантаження за дії чотирьох зосереджених сил, що моделювали рівномірно розподілене навантаження на покрівлю.

Перед початком випробувань для кожного кута нахилу конструкції проводились попередні навантаження, які були початковим контрольним етапом. При цих навантаженнях перевірялася надійність кріплення конструкції, а також готовність і правильність показів усіх приладів, як вантажних, так і встановлених прогиномірів, індикаторів і тензOMETричної апаратури.

Навантаження в процесі випробування прикладалися ступенями у 10% від максимального розрахункового, яке було попередньо обчислене за існуючими методиками розрахунку, з подальшим зменшенням ступенів до 5% по мірі наближення до розрахункового значення навантаження. Витримка після досягнення певного ступеня навантаження складала 10–15 хвилин, щоб дати змогу деформаціям і напруженням стабілізуватися, після чого знімалися покази з усіх приладів та індикаторів.

Навантаження на дослідну конструкцію за кожною схемою навантаження доводилось до розрахункового значення, після чого скидалось на нуль. Після зміни кута нахилу конструкції навантаження проводилися повторно за вищезазначеною схемою. При цьому на кожному етапі експериментального дослідження знімалися покази прогиномірів та тензOMETричної апаратури.

Розрахункове симетричне навантаження на перфорований прогон, яке залежить від кута нахилу конструкції (див. табл. 2.2), визначалося за граничними станами другої групи для вихідного прокатного швелера 22У/ДСТУ 3436–96. Крок зосереджених сил складав 1,2 м.

Для визначення руйнівного навантаження прогон було доведено до руйнування за кута нахилу конструкції  $15^\circ$ . Такий кут нахилу був прийнятий тому, що саме за такого його значення спостерігається найбільший збіг силової площини, тобто напрямку дії сили, з головною центральною віссю інерції перфорованого прогону Z-подібного профілю. Іншими словами, має місце найменше відхилення головної центральної осі інерції від силової площини, що забезпечує найбільшу несучу здатність конструкції, оскільки моменти інерції та опору матимуть у цьому випадку максимальні значення. Для інших вихідних профілів цей кут нахилу буде мати інші значення.

### **3.6. Аналіз результатів експериментальних досліджень**

Обробка результатів з побудовою відповідних графіків нормальних напружень і деформацій проводилась за дії розрахункового навантаження за симетричною схемою навантаження перфорованого прогону Z-подібного профілю для кожного кута нахилу конструкції. Результати досліджень зведено у таблиці і для наочності представлено у вигляді графіків.

#### **3.6.1. Аналіз напруженого стану перфорованого прогону**

Аналіз напруженого стану перфорованого прогону за різних кутів нахилу конструкції здійснювався шляхом порівняння експериментальних і теоретичних даних, отриманих у 13-ти характерних перерізах (по 6 перерізів симетрично відносно середини прольоту балки і один посередині прольоту) на всьому прольоті конструкції (див. рис. 2,7, в). Теоретичні напруження обчислювалися за виразом (1.2...1.5) та в програмному комплексі „Ліра”, а експериментальні – вимірювалися за допомогою тензорезисторів.

Для перфорованого прогону Z-подібного профілю теоретичні та експериментальні значення напружень в стінці конструкції в перерізі по металу представлено у табл. 3.2, а для більшої наочності також наведені графіки зміни нормальних напружень залежно від ступеня навантаження конструкції на рис. 3.12. Значення напружень в полиці прогону в перерізі по металу і графіки їх зміни залежно від ступеня навантаження представлені в табл.Б.2 дод. Б.

Оскільки пряме порівняння теоретичних та експериментальних результатів провести складно, то виконувалось порівняння за площами епюр напружень. На рис. 3.13 наведені епюри значень теоретичних і експериментальних нормальних напружень перфорованого прогону для кутів нахилу  $0^\circ$  і  $15^\circ$ . Середнє відхилення значень для ділянок 1, 2 і 3 відповідно



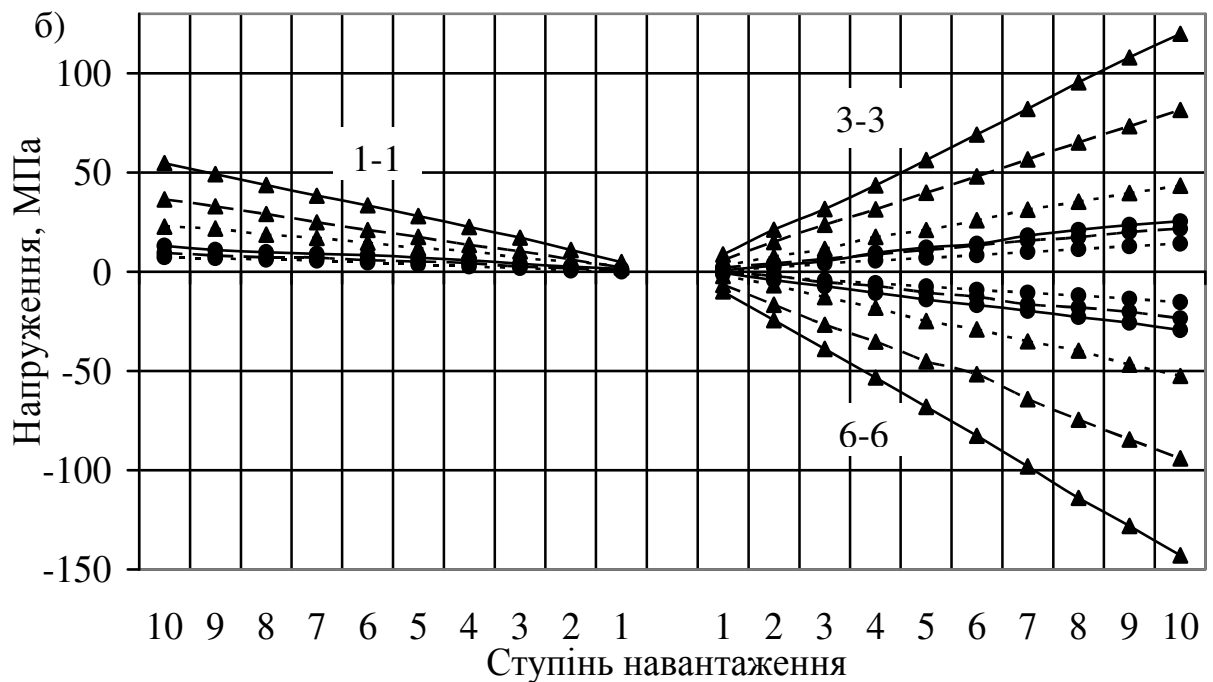
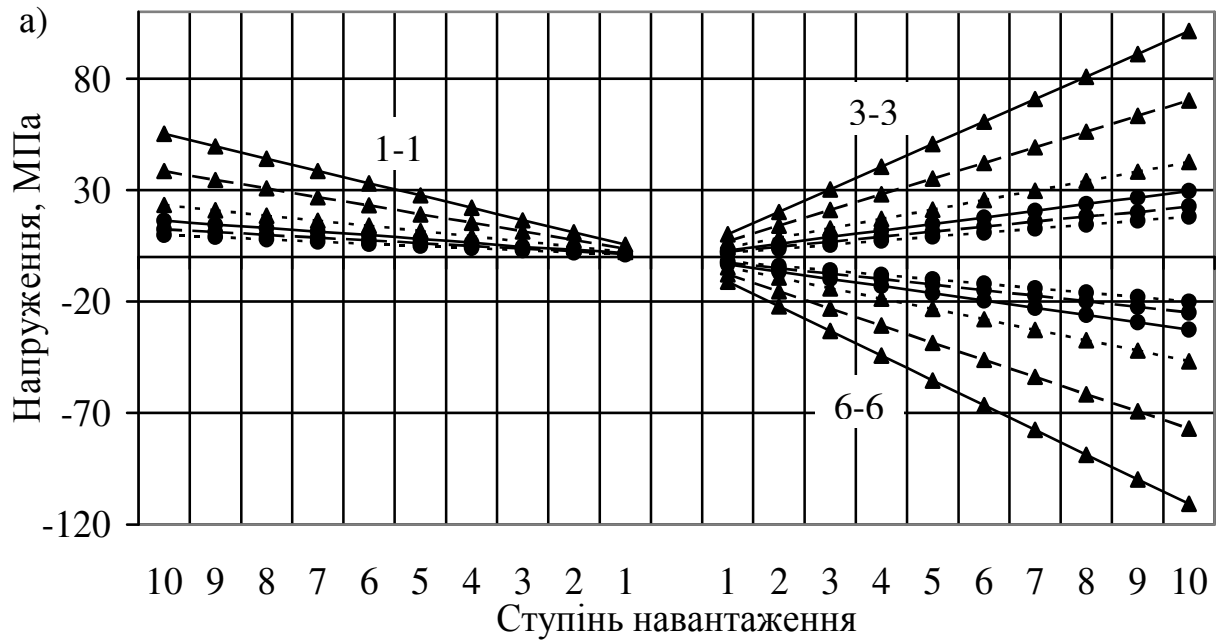
склали 14%, 10% і 8%. На ділянці 1 має місце найбільше розходження у результатах, що можна пояснити наявністю максимальної поперечної сили за одночасної дії незначного згинаючого моменту. Чим ближче до зони чистого згину, тим меншим стає різниця між теоретичними та експериментальними значеннями. Подальші порівняння проводилися за такою самою методикою.

Таблиця 3.2 – Напруження в стінці перфорованого прогону в перерізі без отвору

Кут нахилу	$F$ , кН	Ступінь навант.	Величина навант., кН	Нормальні напруження, МПа					
				Переріз 2-2		Переріз 4-4		Переріз 7-7	
				$\sigma_T$	$\sigma_e$	$\sigma_T$	$\sigma_e$	$\sigma_T$	$\sigma_e$
1	1	3	4	5	6	7	8	9	10
0	8,8	1	0,88	5,5	4,8	10,1	8,6	11,1	9,9
		2	1,76	11,1	11,1	20,2	21,2	22,1	24,3
		3	2,64	16,5	17,2	30,4	31,7	33,2	38,9
		4	3,52	22,1	22,6	40,5	43,6	44,3	53,3
		5	4,4	27,6	28,1	50,6	56,3	55,4	68,1
		6	5,28	33,1	33,5	60,7	69,2	66,5	82,6
		7	6,16	38,6	38,3	70,8	82	77,6	98
		8	7,04	44,1	43,7	80,9	95,5	88,7	114
		9	7,92	49,6	49,3	91	108	99,8	128
		10	8,8	55,3	54,8	101,4	120	110,7	143
5	5,6	1	0,56	3,8	2,3	7	5,9	7,7	6,6
		2	1,12	7,7	6,1	14,1	15,0	15,4	16,7
		3	1,68	11,5	10,4	21,1	23,7	23,1	26,7
		4	2,24	15,4	13,6	28,1	31,5	30,8	35,2
		5	2,8	19,2	17,6	35,2	39,9	38,5	45,1
		6	3,36	23,2	21,1	42,2	48,1	46,1	51,6
		7	4,92	26,8	24,9	49,2	56,6	53,8	64,2
		8	4,48	30,8	29,1	56,2	65,2	61,5	74,6
		9	5,04	34,6	32,9	63,3	73,3	69,2	84,5
		10	5,6	38,5	36,5	70,2	81,6	76,9	94
10	3,3	1	0,33	2,3	2,9	4,3	2,9	4,7	2,1
		2	0,66	4,7	5,2	8,5	7,7	9,3	6,8
		3	0,99	7	7	12,8	11,5	14	12,8
		4	1,32	9,3	10,5	17,1	17,5	18,7	18,1
		5	1,65	11,7	11,9	21,3	21	23,3	24,8

продовження табл. 3.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	3,3	6	1,98	14	14,7	25,5	26	28	29
		7	2,31	16,3	17,1	29,8	31,3	32,7	35,1
		8	2,64	18,6	18,8	34,1	35,3	37,3	39,8
		9	2,97	21	21,7	38,3	39,6	42	46,7
		10	3,3	23,3	22,8	42,6	43,3	46,7	52,4
15	2,3	1	0,23	1,7	1,4	2,9	0,6	3,3	0,6
		2	0,46	3,3	2,7	5,9	3,1	6,5	4,2
		3	0,69	4,5	4	8,9	5,4	9,8	7,2
		2,3	0,92	6,4	5,8	11,8	9,5	13	10,6
		5	1,15	8,1	7,1	14,8	12,2	16,3	13,9
		6	1,38	9,8	8,4	17,7	14,1	19,5	16,8
		7	1,61	11,4	9	20,7	18,2	22,8	19,6
		8	1,84	13	9,8	23,7	21	26	22,9
		9	2,07	14,5	11	26,6	23,6	29,3	25,7
		10	2,3	16,3	13	29,6	25,5	32,5	29,3
20	1,8	1	0,18	1,3	0,5	2,3	2,2	2,5	0,1
		2	0,36	2,5	1,7	4,6	4,2	5	2,1
		3	0,54	3,7	2,7	6,8	6,5	7,5	5,3
		4	0,72	5	4,4	9,1	8,7	9,9	7,1
		5	0,9	6,2	5,2	11,4	11,1	12,4	10,4
		6	1,08	7,5	5,9	13,6	13,2	14,9	12,6
		7	1,26	8,7	7,1	15,9	15,7	17,4	16,4
		8	1,44	9,9	7,4	18,2	17,4	19,9	18
		9	1,62	11,2	8,1	20,1	20,1	22,4	20,1
		10	1,8	12,4	9,5	22,7	21,8	24,9	23,5
25	1,5	1	0,15	1	0,2	1,8	0,9	2	1,2
		2	0,3	2	0,7	3,6	2,2	4	2,4
		3	0,45	3	2	5,4	4,1	6	4,4
		4	0,6	4	2,7	7,3	5,6	8	5,8
		5	0,75	4,9	3,7	9,1	7	10	7,4
		6	0,9	5,9	4,6	10,9	8,3	12	9
		7	1,05	6,9	5,7	12,7	10,1	14	10,6
		8	1,2	7,9	6,2	14,5	11,4	16	11,9
		9	1,35	8,9	6,9	16,3	12,8	18	13,6
		10	1,5	9,9	7,3	18,1	14,2	20	15,3



Позначення кривих нормальних напружень, якщо кут нахилу конструкції:

—▲— —  $0^\circ$ ; —▲— —  $5^\circ$ ; ...▲... —  $10^\circ$ ; —●— —  $15^\circ$ ; —●— —  $20^\circ$ ; ...●... —  $25^\circ$

Рисунок 3.12 – Напруження в перерізі без отвору в стінці перфорованого прогону

а – теоретичні; б – експериментальні; 1, 3, 6 – характерні перерізи прогону  
(див. рис. 3.1, а)

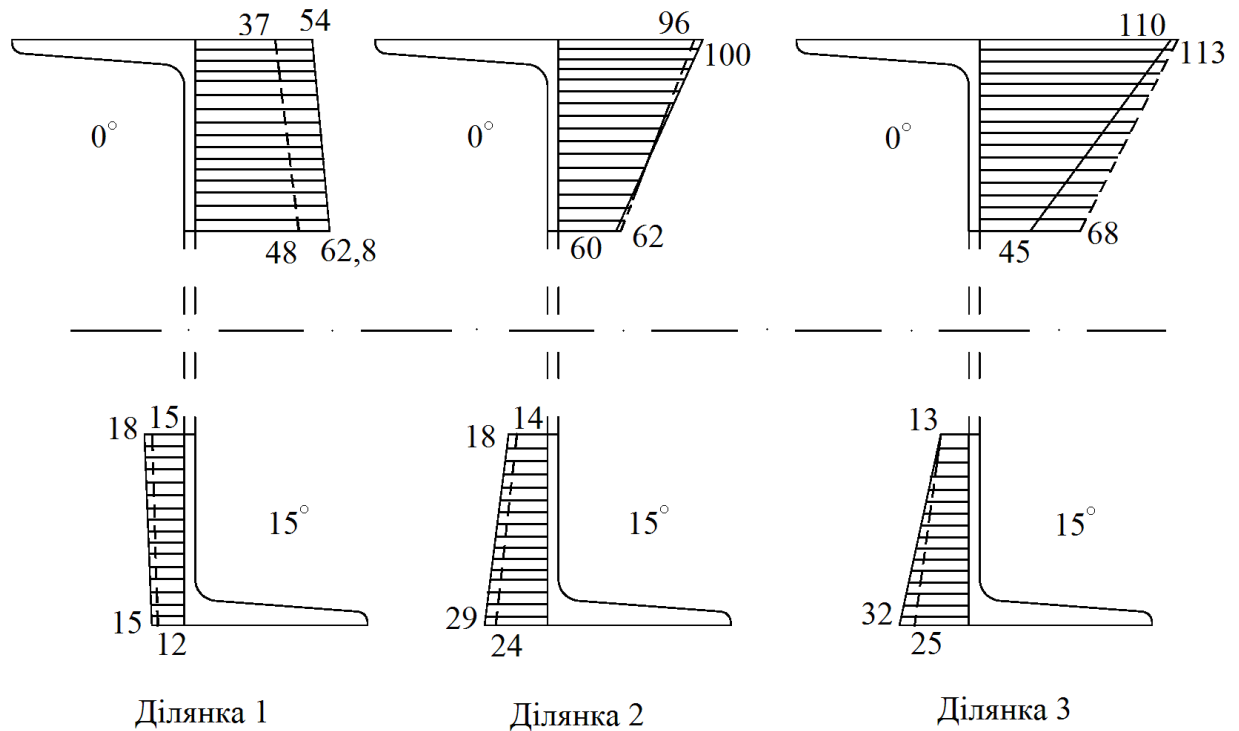


Рисунок 3.13 – Площі епюр нормальних напружень (МПа) у характерних перерізах перфорованого прогону

————— – теоретичні значення; - - - - - – експериментальні значення

Теоретичні та експериментальні значення напружень в стінці конструкції в перерізі з отвором представлено у табл. 3.3, і для більшої наочності також наведено на графіка нормальних напружень залежно від ступеня навантаження конструкції на рис. 3.14 і 3.15. Значення напружень в полиці прогону в перерізі з отвором і графіки їх зміни залежно від ступеня навантаження представлені в табл. Б.3, дод. Б.

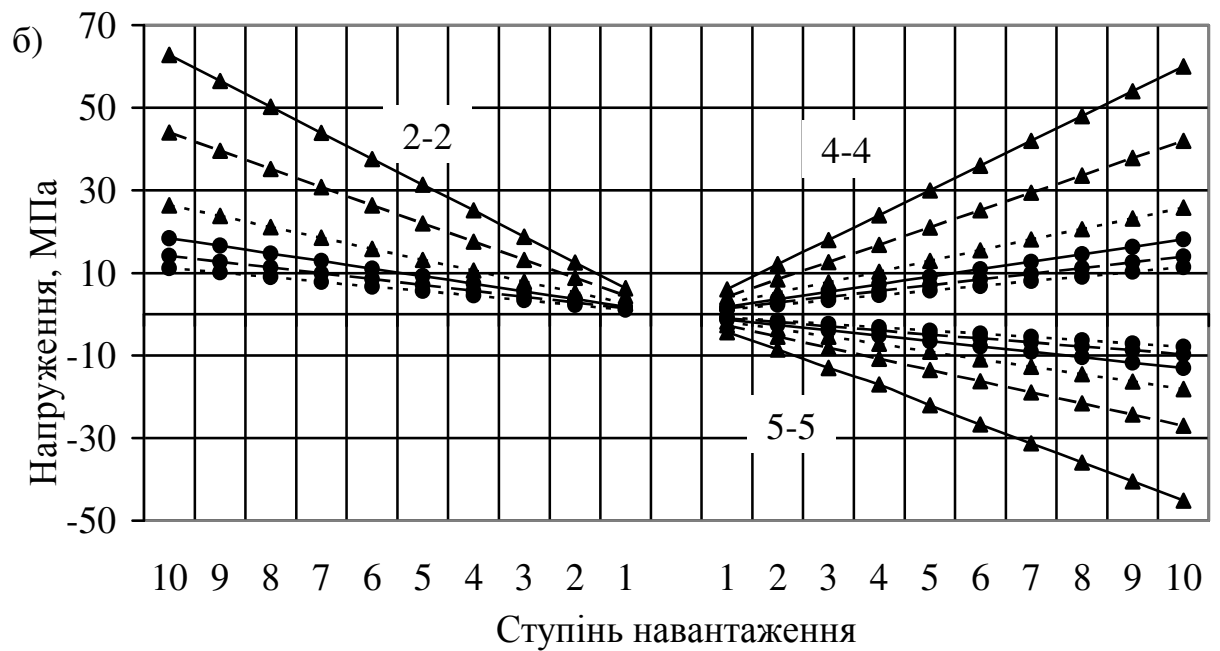
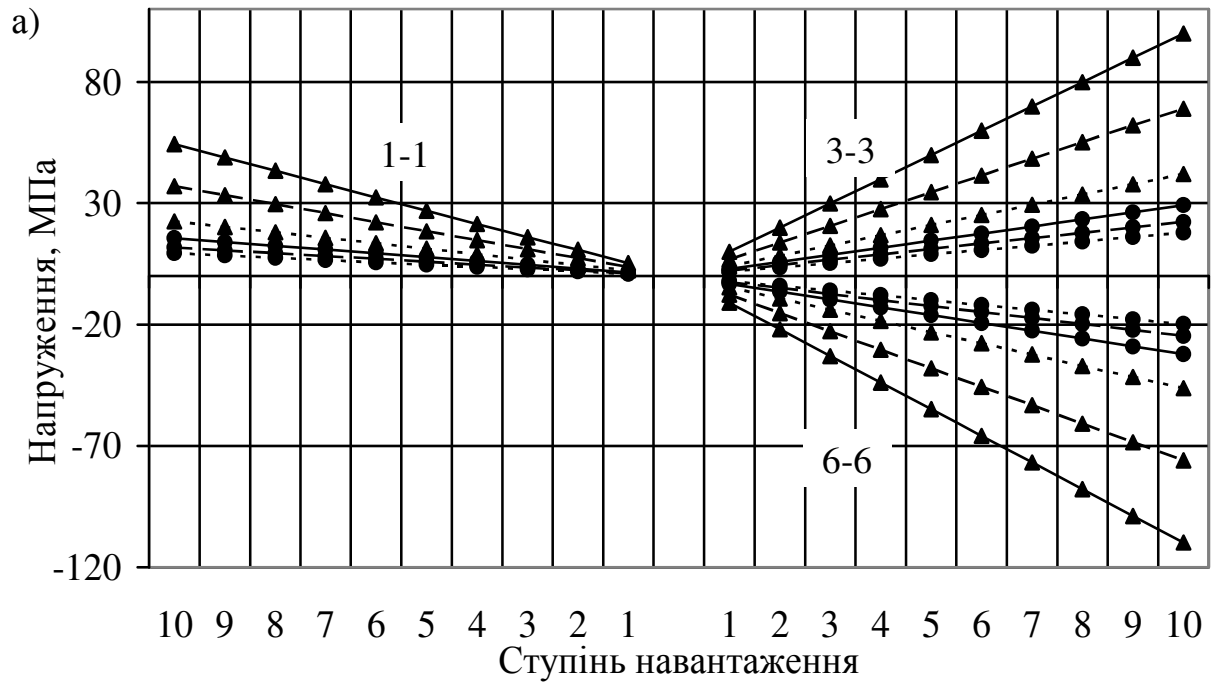
Середнє відхилення значень експериментальних напружень від теоретичних у стінці перфорованого прогону в перерізі по верху отвору склало: для ділянки 1 – 15%, для ділянки 2 – 9%; для ділянки 3 – 7%. Для того самого перерізу біля краю отвору відхилення результатів склало: для ділянки 1 – 13%, для ділянки 2 – 10%; для ділянки 3 – 7%.

Таблиця 3.3 – Напруження в стінці перфорованого прогону в перерізі з отвором

Кут нахилу конструкції	Нормальні напруження, МПа											
	Переріз 3-3				Переріз 5-5				Переріз 6-6			
	Точка				Точка				Точка			
	1		2		1		2		1		2	
	$\sigma_T$	$\sigma_e$	$\sigma_T$	$\sigma_e$	$\sigma_T$	$\sigma_e$	$\sigma_T$	$\sigma_e$	$\sigma_T$	$\sigma_e$	$\sigma_T$	$\sigma_e$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	5,4	3,7	6,3	4,8	10,0	9,6	6	6,2	11,0	11,3	4,4	6,8
	10	7,4	12,5	9,6	20,0	19,2	12	12,4	21,9	22,6	8,5	13,6
	16	11,1	18,8	14,4	29,9	28,8	18	18,6	32,9	33,9	13,0	20,4
	21	14,8	25,2	19,2	39,9	38,4	24,0	24,8	43,9	45,2	17,0	27,2
	26	18,5	31,3	24,0	49,9	48,0	30,0	31,0	54,8	56,5	22,1	34,0
	32	22,2	37,6	28,8	59,9	57,6	36,0	37,2	65,8	67,8	26,7	40,8
	37	25,9	43,9	33,6	69,9	67,2	42,0	43,4	76,8	79,1	31,3	47,6
	43	29,6	50,2	38,4	79,9	76,8	48,0	49,6	87,8	90,4	35,9	54,4
	48	33	56,5	43,2	89,9	86,4	54,0	55,8	98,8	101,7	40,5	61,2
	54	37	62,8	48,0	99,9	96,0	60,0	62,0	109,8	113,0	45,1	68,0
5	3,7	4,2	4,4	5,2	6,9	7,8	4,2	6,6	7,6	7,3	2,7	3,1
	7,4	8,4	8,8	10,4	13,8	15,6	8,4	13,2	15,2	14,6	5,4	6,2
	11	12,6	13,2	15,6	20,7	23,4	12,6	19,8	22,8	21,9	8,1	9,3
	14	16,8	17,6	20,8	27,6	31,2	16,8	26,4	30,4	29,2	10,8	12,4
	18	21,0	22,0	26,0	34,5	39,0	21,0	33,0	38,0	36,5	13,5	15,5
	22	25,2	26,4	31,2	41,4	46,8	25,2	39,6	45,6	43,8	16,2	18,6
	25	29,4	30,8	36,4	48,3	54,6	29,4	46,2	53,2	51,1	18,9	21,7
	29	33,6	35,2	41,6	55,2	62,4	33,6	52,8	60,8	58,4	21,6	24,8
	33	37,8	39,6	46,8	62,1	70,2	37,8	59,4	68,4	65,7	24,3	27,9
	37	42,0	44,0	52,0	69,0	78,0	42,0	66,0	76,0	73,0	27,0	31,0
10	2,3	1,5	2,6	2,1	4,2	4,4	2,6	2,4	4,6	5,0	1,8	1,9
	4,5	3,0	5,3	4,2	8,4	8,8	5,2	4,8	9,2	10,0	3,6	3,8
	6,8	4,5	7,9	6,3	12,6	13,2	7,7	7,2	13,9	15,0	5,4	5,7
	9,0	6,0	10,6	8,4	16,8	17,6	10,3	9,6	18,5	20,0	7,2	7,6
	11	7,5	13,2	10,5	21,0	22,0	12,9	12,0	23,1	25,0	9,1	9,5
	13	9,0	15,8	12,6	25,2	26,4	15,5	14,4	27,7	30,0	10,9	11,4
	15	10,5	18,5	14,7	29,4	30,8	18,1	16,8	32,3	35,0	12,7	13,3
	18	12,0	21,1	16,8	33,6	35,2	20,6	19,2	37,0	40,0	14,5	15,2
	20	13,5	23,8	18,9	37,8	39,6	23,2	21,6	41,6	45,0	16,3	17,1
	22	15,0	26,4	21,0	42,0	44,0	25,8	24,0	46,2	50,0	18,1	19,0
15	1,6	1,2	1,8	1,5	2,9	2,4	1,8	1,4	3,2	2,5	1,3	1,3
	3,1	2,4	3,7	3,0	5,8	4,8	3,6	2,8	6,4	5,0	2,6	2,6

продовження табл. 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
15	4,7	3,6	5,5	4,5	8,8	7,2	5,4	4,2	9,7	7,5	3,9	3,9
	6,2	4,8	7,4	6,0	11,7	9,6	7,2	5,6	12,9	10,0	5,2	5,2
	7,8	6,0	9,2	7,5	14,6	12,0	9,1	7,0	16,1	12,5	6,5	6,5
	9,4	7,2	11,0	9,0	17,5	14,4	10,9	8,4	19,3	15,0	7,8	7,8
	10	8,4	12,9	10,5	20,4	16,8	12,7	9,8	22,5	17,5	9,1	9,1
	12	9,6	14,7	12,0	23,4	19,2	14,5	11,2	25,8	20,0	10,4	10,4
	14	10,8	16,6	13,5	26,3	21,6	16,3	12,6	29,0	22,5	11,7	11,7
	15	12,0	18,4	15,0	29,2	24,0	18,1	14,0	32,2	25,0	13,0	13,0
20	1,2	0,8	1,4	1,3	2,2	1,9	1,4	1,0	2,5	2,3	1,0	1,2
	2,4	1,6	2,8	2,6	4,5	3,8	2,8	2,0	4,9	4,6	1,9	2,4
	3,5	2,4	4,2	3,9	6,7	5,7	4,2	3,0	7,4	6,9	2,9	3,6
	4,7	3,2	5,6	5,2	8,9	7,6	5,6	4,0	9,9	9,2	3,9	4,8
	5,9	4,0	7,1	6,5	11,2	9,5	7,0	5,0	12,4	11,5	4,9	6,0
	7,1	4,8	8,5	7,8	13,4	11,4	8,4	6,0	14,8	13,8	5,8	7,2
	8,3	5,6	9,9	9,1	15,6	13,3	9,8	7,0	17,3	16,1	6,8	8,4
	9,4	6,4	11,3	10,4	17,8	15,2	11,2	8,0	19,8	18,4	7,8	9,6
	10	7,2	12,7	11,7	20,1	17,1	12,6	9,0	22,2	20,7	8,7	10,8
	11	8,0	14,1	13,0	22,3	19,0	14,0	10,0	24,7	23,0	9,7	12,0
25	0,9	0,4	1,1	1,1	1,8	1,4	1,1	1,1	2,0	1,3	0,8	1,2
	1,9	0,8	2,2	2,2	3,6	2,8	2,3	2,2	4,0	2,6	1,6	2,4
	2,8	1,2	3,4	3,3	5,4	4,2	3,4	3,3	5,9	3,9	2,4	3,6
	3,8	1,6	4,5	4,4	7,2	5,6	4,6	4,4	7,9	5,2	3,2	4,8
	4,7	2,0	5,6	5,5	9,0	7,0	5,7	5,5	9,9	6,5	4,0	6,0
	5,6	2,4	6,7	6,6	10,7	8,4	6,8	6,6	11,9	7,8	4,7	7,2
	6,6	2,8	7,8	7,7	12,5	9,8	8,0	7,7	13,9	9,1	5,5	8,4
	7,5	3,2	9,0	8,8	14,3	11,2	9,1	8,8	15,8	10,4	6,3	9,6
	8,5	3,6	10,1	9,9	16,1	12,6	10,3	9,9	17,8	11,7	7,1	10,8
	9,4	4,0	11,2	11,0	17,9	14,0	11,4	11,0	19,8	13,0	7,9	12,0



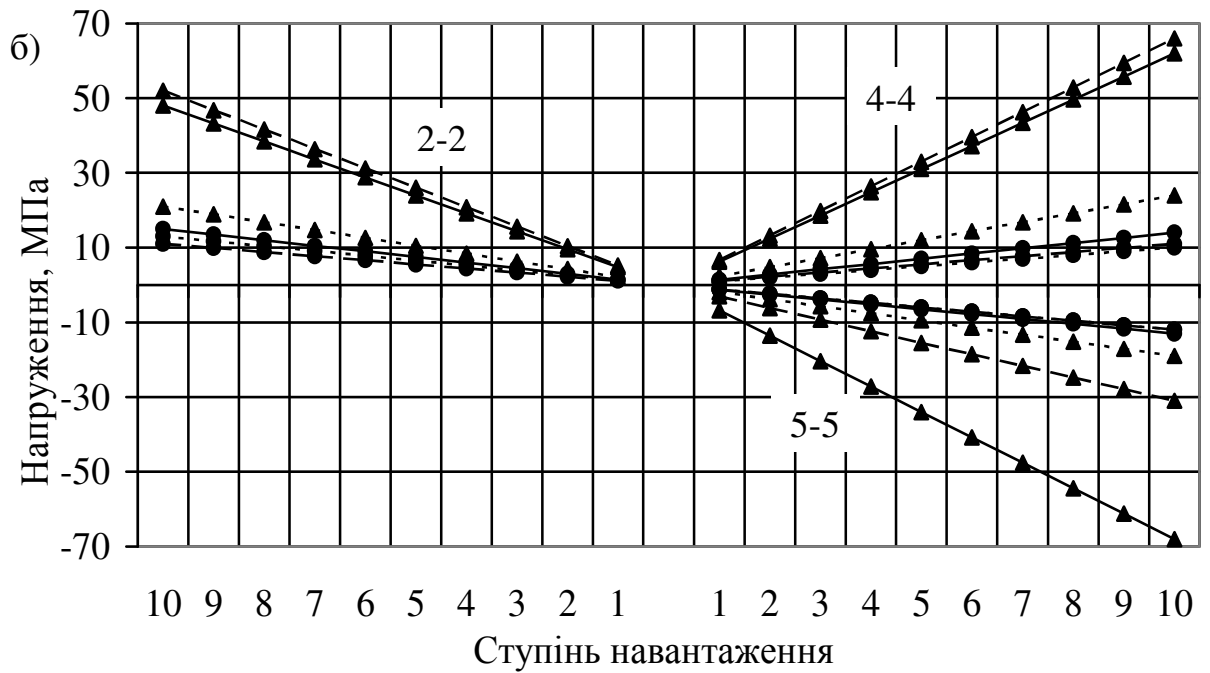
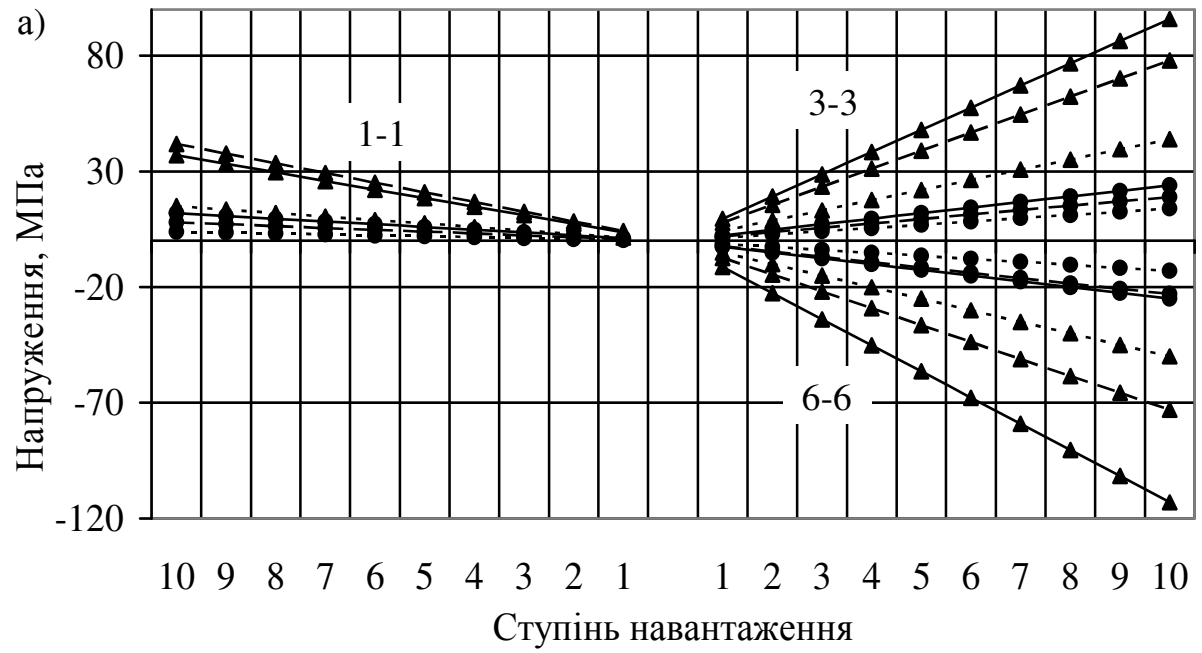
Позначення кривих нормальних напружень, якщо кут нахилу конструкції:

—▲— — 0°; —▲— — 5°; ...▲... — 10°; —●— — 15°; —●— — 20°; ...●... — 25°

Рисунок 3.14 – Теоретичні нормальні напруження в стінці перфорованого прогону в перерізі з отвором

а – зверху перерізу; б – біля отвору; 1...6 – характерні перерізи прогону

(див. рис. 3.1, а)



Позначення кривих нормальних напружень, якщо кут нахилу конструкції:

—▲— 0°; —▲— 5°; ...▲... 10°; —●— 15°; —●— 20°; ...●... 25°

Рисунок 3.15 – Експериментальні нормальні напруження в стінці перфорованого прогону в перерізі з отвором

а – зверху перерізу; б – біля отвору; 1...6 – характерні перерізи прогону (див. рис. 3.1, а)

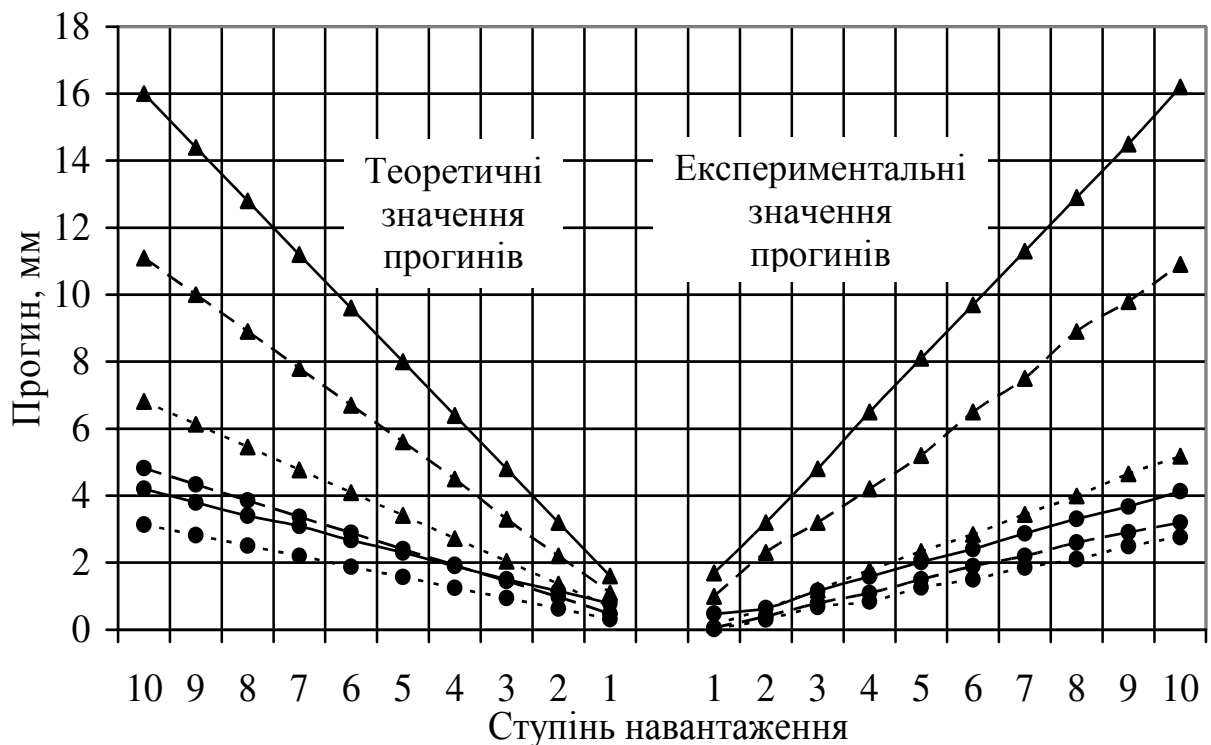


### 3.6.2. Деформативність конструкції

Теоретичні значення прогинів були отримані шляхом використання формули початкових параметрів (2.1). Експериментальні дані отримано за допомогою прогиномірів, які встановлювалися у перерізі з найбільшими прогинами – посередині прольоту конструкції (див. рис. 3.5).

Отримані значення теоретичних прогинів за дії розрахункового зосередженого навантаження та їх порівняння з експериментальними даними наведено у табл. 3.4. Експериментальні значення прогинів за дії розрахункового експлуатаційного навантаження не перевищили гранично допустимого значення, що становить  $1/200$  прольоту, тобто 3,0 см (рис. 3.16).

Переміщення в поперечному напрямку із площини дії навантаження склали  $1/2000$  прольоту за дії розрахункового експлуатаційного навантаження, що набагато менше від максимально допустимих значень.



Позначення кривих прогинів, якщо кут нахилу конструкції:

—▲— — 0°; —▲— — 5°; ...▲... — 10°; —●— — 15°; —●— — 20°; ...●... — 25°

Рисунок 3.16 – Прогини перфорованого прогону

Таблиця 3.4 – Прогин перфорованого прогону

Кут нахилу	$F$ , кН	Ступінь навантаж.	Величина навантаж.	Прогин, мм		Кут нахилу	$F$ , кН	Ступінь навантаж.	Величина навантаж.	Прогин, мм	
				$\delta_T$	$\delta_e$					$\delta_T$	$\delta_e$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	8,8	1	0,88	1,6	1,7	5	5,6	1	0,56	1,1	1,0
		2	1,76	3,2	3,2			2	1,12	2,2	2,3
		3	2,64	4,8	4,8			3	1,68	3,3	3,2
		4	3,52	6,4	6,5			4	2,24	4,5	4,2
		5	4,4	8	8,1			5	2,8	5,6	5,2
		6	5,28	9,6	9,7			6	3,36	6,7	6,5
		7	6,16	11,2	11,3			7	4,92	7,8	7,5
		8	7,04	12,8	12,9			8	4,48	8,9	8,9
		9	7,92	14,4	14,5			9	5,04	10,0	9,8
		10	8,8	16	16,2			10	5,6	11,1	10,9
10	3,3	1	0,33	0,68	0,14	15	2,3	1	0,23	0,48	0,06
		2	0,66	1,36	0,63			2	0,46	0,97	0,4
		3	0,99	2,04	1,19			3	0,69	1,45	0,79
		4	1,32	2,72	1,78			4	0,92	1,93	1,1
		5	1,65	3,41	2,34			5	1,15	2,41	1,5
		6	1,98	4,09	2,84			6	1,38	2,89	1,9
		7	2,31	4,77	3,44			7	1,61	3,37	2,2
		8	2,64	5,45	3,99			8	1,84	3,86	2,6
		9	2,97	6,13	4,65			9	2,07	4,34	2,9
		10	3,3	6,81	5,18			10	2,3	4,82	3,2
20	1,8	1	0,18	0,78	0,48	25	1,5	1	0,15	0,31	0,02
		2	0,36	1,16	0,64			2	0,3	0,63	0,3
		3	0,54	1,5	1,16			3	0,45	0,94	0,68
		4	0,72	1,9	1,58			4	0,6	1,25	0,84
		5	0,9	2,3	2,02			5	0,75	1,57	1,26
		6	1,08	2,67	2,41			6	0,9	1,88	1,5
		7	1,26	3,1	2,87			7	1,05	2,2	1,86
		8	1,44	3,4	3,31			8	1,2	2,51	2,1
		9	1,62	3,8	3,68			9	1,35	2,82	2,5
		10	1,8	4,2	4,13			10	1,5	3,14	2,76

### 3.7. Руйнування експериментальної конструкції прогону

Експериментальні дослідження в цілому підтвердили розроблену методику розрахунку та доцільність використання перфорованих елементів Z-подібного профілю як прогонів покриття.

Було встановлено, що після досягнення рівня розрахункового навантаження 16,8 кН, визначеного для перфорованого профілю за граничними станами II групи, видимих руйнувань в конструкції не спостерігалось. Отримані значення напружень при цьому становили  $\sigma = 198$  МПа, а вертикальні переміщення в прольоті прогону склали не більше 1/200, а саме 27,28 мм при допустимих 30 мм.

За вузлового навантаження величиною 20,9 кН відбулася місцева втрата стійкості полиці і стінки верхнього поясу в перерізі з отвором (рис. 3.17, в, г), що призвело до загальної втрати стійкості стиснутого поясу на 3 ділянці між точками закріплення (рис. 3.17, б). Втрата стійкості полиці стиснутого поясу відбулася на відстані 100 мм біля другої зосередженої сили від краю прогону, а стінки отвору – на відстані 150 мм від тієї ж самої сили (рис. 3.18).

Запас несучої здатності склав 1,1. Значення теоретичних і експериментальних прогинів наведено у табл. 3.5, а для наочності побудовано графіки зміни прогинів перфорованого прогону залежно від ступеня навантаження конструкції (рис. 3.19). Максимальні напруження за дії вузлового навантаження 20,9 кН були зафіксовані в точці 5 на ділянці 3 і склали  $\sigma_{max} = 232$  МПа.

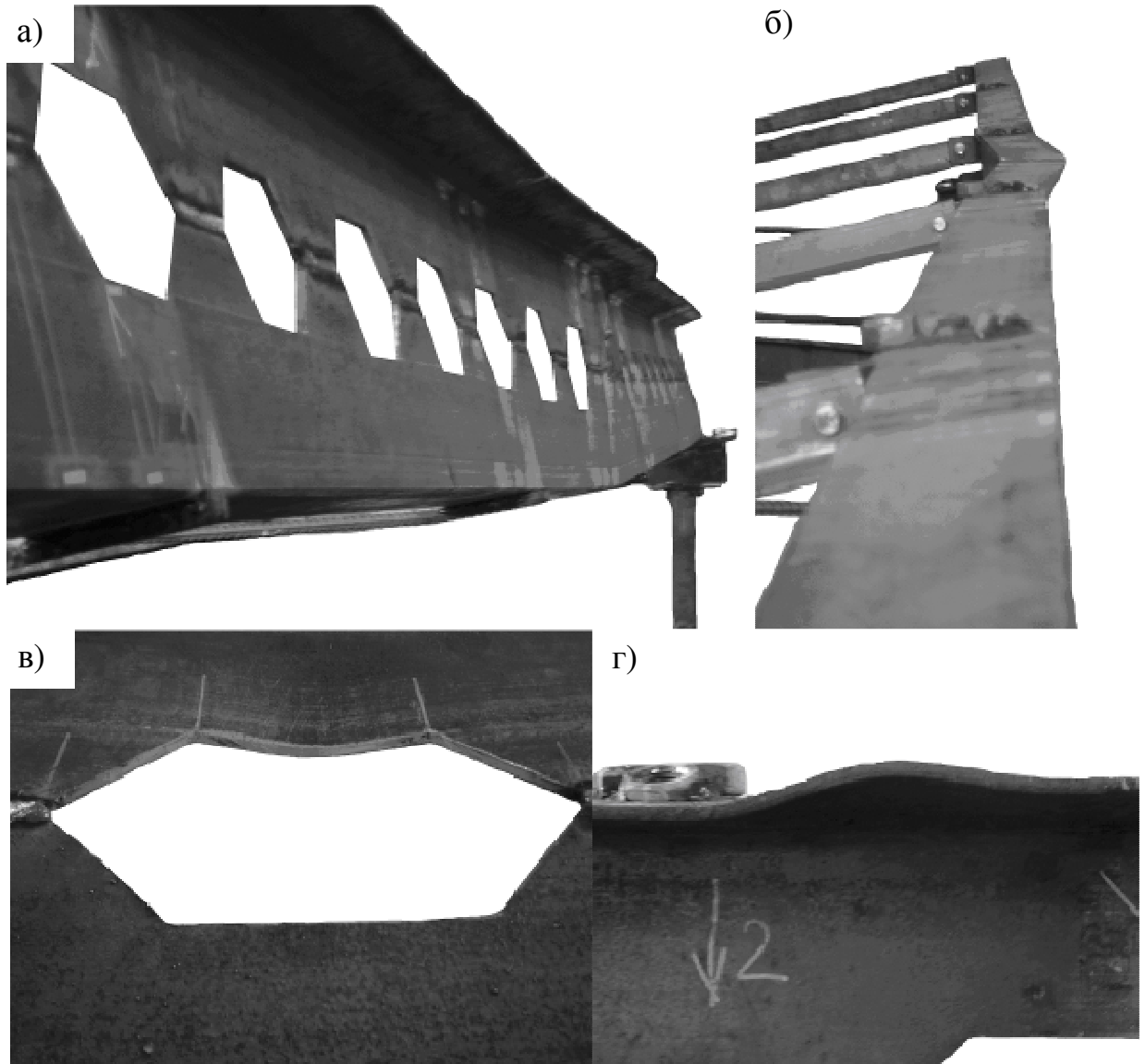


Рисунок 3.17 – Втрата стійкості елементів поперечного перерізу прогону  
 а – загальний вигляд прогону після руйнування; б – верхній пояс (вигляд з боку); в – втрата стійкості стінки; г – втрата стійкості полиці

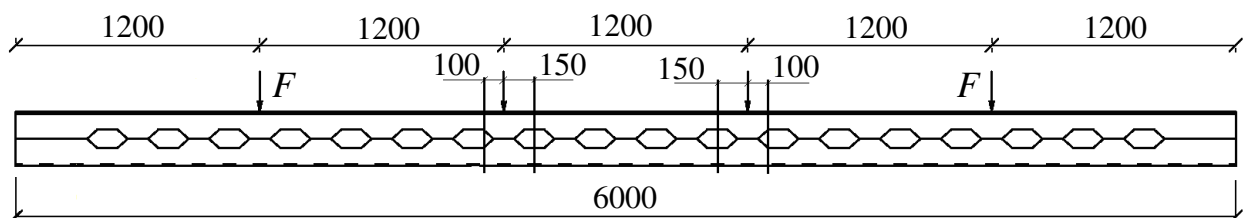


Рисунок 3.18 – Перерізи в яких відбулася втрата стійкості

Таблиця 3.5 – Теоретичні та експериментальні значення прогинів під час руйнування перфорованого прогону

Ступінь навантаження	Навантаження, кН	Переміщення, мм	
		Теоретичні	Експериментальні
1	2,8	5	4,53
2	5,6	10	9,08
3	8,4	15	13,54
4	11,2	20	18,2
5	14,0	25	22,63
6	16,8	30	27,28
7	18,5	33	30
8	19,6	35	31,78
9	20,9	37,3	33,95

Примітка: сірим кольором позначено розрахункове навантаження на перфорований прогон за граничними станами II групи.

Як видно, на всіх ступенях навантаження конструкція працювала в пружній стадії роботи матеріалу. Різниця між значеннями теоретичних і експериментальних прогинів склала 9%.

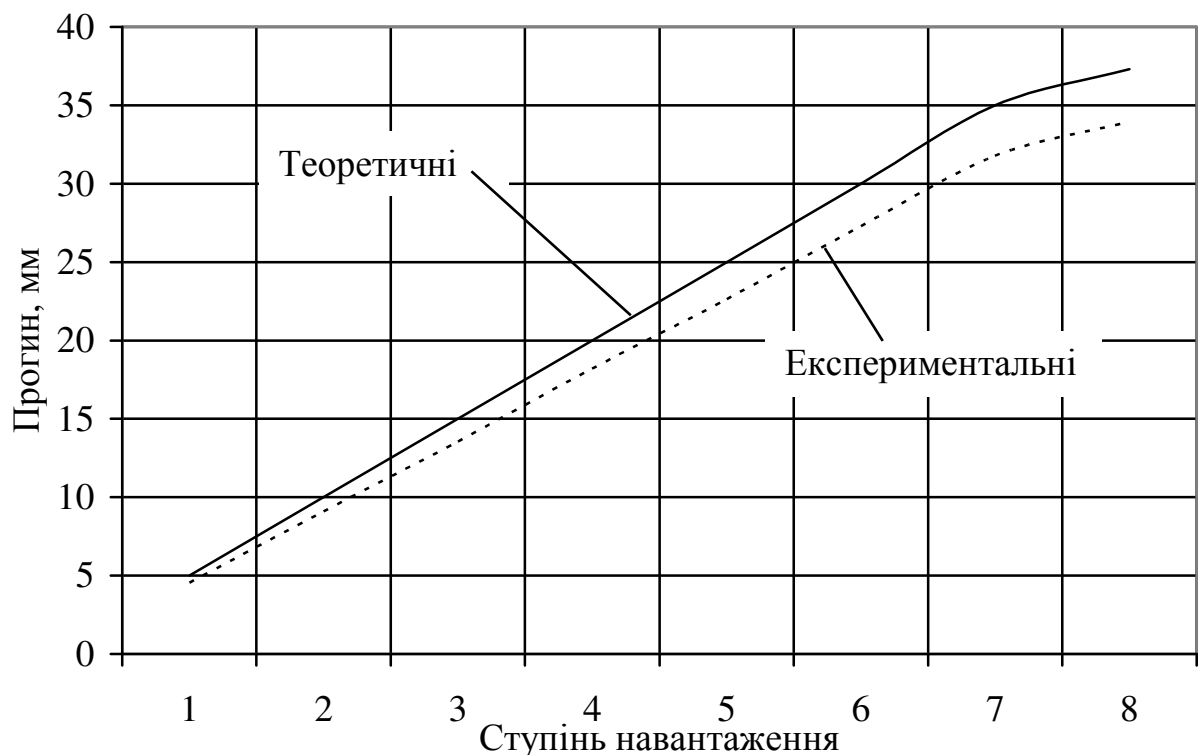


Рисунок 3.19 –Прогини перфорованого прогону

### 3.8. Висновки до розділу 3

1) Розроблено конструкцію дослідного зразка перфорованого прогону Z-подібного профілю довжиною 6 м на основі вихідного швелера №22У/ДСТУ 3436–96 з коефіцієнтом розвитку висоти перерізу 1,2.

2) Розроблено дослідну установку, яка дозволяє закріпити конструкцію в площині та із площини відповідно до прийнятої розрахункової схеми, та виконувати експериментальні дослідження згинальних елементів прольотом 6 м в умовах поперечного і косого згинів з можливістю зміни кута нахилу в діапазоні  $0^{\circ} \dots 25^{\circ}$  відповідно до ухилу покрівлі будівлі.

3) Вперше отримано нові експериментальні дані про напружено-деформований стан перфорованих елементів Z-подібного профілю, що працюють в умовах косого згину, в характерних точках поперечних перерізів з отворами і без отворів на трьох розрахункових ділянках по довжині прогону.

4) Встановлено, що середні відхилення експериментальних значень напружень від теоретичних в характерних перерізах перфорованого прогону склали: для ділянки 1 – 14%; для ділянки 2 – 9%; для ділянки 3 – 7% в запас міцності конструкції.

5) Встановлено, що сумарні експериментальні деформації перфорованого прогону Z-подібного профілю відрізняються від теоретичних в середньому на 9%. Значення деформацій в усіх характерних точках по довжині конструкції за дії розрахункового експлуатаційного навантаження 16,8 кН, визначеного за граничними станами другої групи, не перевищували граничного прогину  $1/200 L$ , встановленого нормами проектування конструкцій, і склали 27,28 мм.

6) Побудовано графіки зміни напружень в характерних точках залежно від місця розміщення перерізу по довжині прогону та кута нахилу

конструкції, які засвідчили пружну роботу матеріалу на всіх ступенях навантаження, визначеного за граничними станами другої групи.

7) Побудовано графіки прогинів перфорованого прогону залежно від величини зовнішнього навантаження та кута нахилу конструкції, які мають лінійний характер.

8) Встановлено, що руйнування перфорованого прогону відбулося через втрату місцевої стійкості полиці та стінки на третій ділянці конструкції, де має місце максимальний згинальний момент, що призвело до загальної втрати стійкості верхнього поясу прогону із площини. Коефіцієнт запасу за деформаціями склав 1,1.

9) Експериментально підтверджена можливість та доцільність використання перфорованих елементів Z-подібного профілю як прогонів покриття у покрівлях з ухилом  $0^{\circ} \dots 25^{\circ}$ .

10) Матеріали розділу відображено в роботах [96, 101].

## **Розділ 4.**

### **Розрахунок перфорованих профілів в умовах косого згину**

#### **4.1. Основні передумови для розрахунку Z-подібних перфорованих профілів в умовах косого згину**

До складних напружених станів, одним з яких є косий згин, належать такі види деформацій, за яких у поперечних перерізах елементів виникатимуть не менше двох внутрішніх силових факторів. Виключенням є прямий поперечний згин, який не прийнято розглядати як випадок складного опору, хоча при цьому в перерізах і виникають два внутрішні силові фактори – згинаючий момент і поперечна сила. Цей вид деформації розглядають як простий, оскільки у переважаючій більшості випадків розрахунок на міцність і жорсткість ведуть без урахування впливу поперечних сил, тобто тільки за дії одного силового фактору – згинаючого моменту.

Косий згин відносять до першої групи складного опору, оскільки в небезпечних точках поперечного перерізу напружений стан є або одноосьовим, або може наближено розглядатися як такий у зв'язку з незначним впливом на міцність перерізу дотичних напружень, які в ньому виникають. Тому в таких випадках в розрахунках на міцність теорії міцності не використовуються.

Прогони покриття у складі покрівлі з певним ухилом працюють в умовах косого згину. Косим називають такий вид згину, за якого площа дії згинаючого моменту в даному поперечному перерізі елемента не збігається з жодною з головних центральних осей інерції цього перерізу.

Випадок косого згину, за якого в поперечному перерізі виникає лише згинаючий момент, називається чистим косим згином. Якщо ж в перерізі діє, окрім того, поперечна сила, то має місце поперечний косий згин.



Як видно з рис. 4.1, а, на ділянках 1 і 2 перфорованого прогону виникатиме косий поперечний згин, оскільки, як було зазначено вище, на даних ділянках присутні як згинаючий момент, так і поперечна сила, причому на ділянці 1 поперечна сила є найбільшою на всьому прольоті конструкції, а згинаючий момент найменшим. Для ділянки 2 ситуація дещо інша – поперечна сила зменшується за одночасного збільшення згинаючого моменту. На ділянці 3 має місце чистий косий згин, оскільки поперечна сила дорівнює нулю, а згинаючий момент є максимальним. На рис. 4.1, б зображено фрагмент стінки перфорованого прогону Z-подібного профілю до якого прикладені вертикальна сила  $F_1$  і горизонтальна сила  $F_2$ , які є складовими зовнішнього навантаження  $F$ .

В поперечному перерізі ділянок 1 і 2 відносно осі  $z$  виникає згинаючий момент  $M_z = F_1 x$ , який діє в головній площині  $yx$ , і поперечна сила  $Q_y = -F_1$ . В поперечному перерізі відносно осі  $y$  виникають згинаючий момент  $M_y = F_2 x$  в головній площині  $zx$  і поперечна сила  $Q_z = -F_2$ . Повний згинаючий момент на кожній з ділянок  $M = \sqrt{M_z^2 + M_y^2}$  діє в площині, яка не збігається з жодною з головних площин перерізу. Тому на ділянках 1 і 2 присутній поперечний косий згин. Таким чином, косий згин можна розглядати як поєднання двох прямих згинів, викликаних згинаючими моментами відносно головних центральних осей інерції поперечного перерізу  $y$  і  $z$ .

Спираючись на принцип незалежності дії сил, повні нормальні напруження в поперечних перерізах прогону дорівнюють сумі напружень від окремої дії моментів  $M_z$  і  $M_y$ . Відповідно, в точці  $C$  поперечного перерізу (рис. 4.1, б) повне нормальне напруження

$$\sigma = \sigma_{M_z} + \sigma_{M_y} = \pm (M_z / J_z) y \pm (M_y / J_y) z. \quad (4.1)$$

У формулі (4.1) перед першим членом правої частини приймається знак плюс, якщо момент  $M_z$  викликає розтяг в точках перерізу з додатними координатами  $y$ , а перед другим членом – якщо момент  $M_y$  викликає розтяг в точках з додатними координатами  $z$ . У формулу (4.1) підставляються абсолютні значення згинаючих моментів.

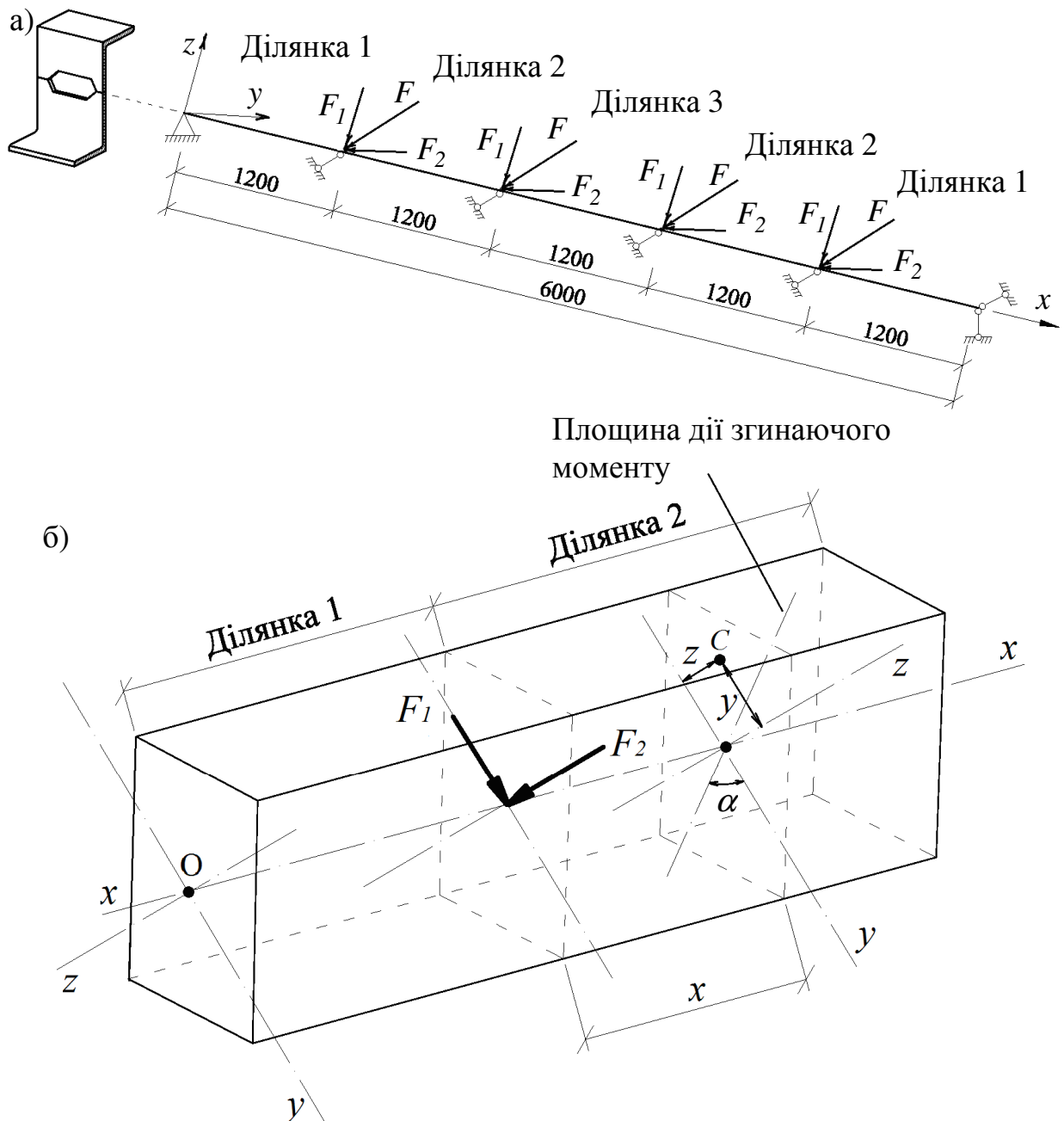


Рисунок 4.1 – Складний опір перфорованого профілю  
а – розрахункова схема прогону; б – фрагмент стінки прогону

На рис. 4.2, а наведено епюри нормальних напружень  $\sigma_{M_z}$  і  $\sigma_{M_y}$  в поперечному перерізі ділянки 2 перфорованого Z-подібного профілю (див. рис. 4.1) від окремої дії згинаючих моментів  $M_z$  і  $M_y$ . Епюру  $\sigma$  від сумісної дії моментів  $M_z$  і  $M_y$  зображено в аксонометрії на рис. 4.2, б.

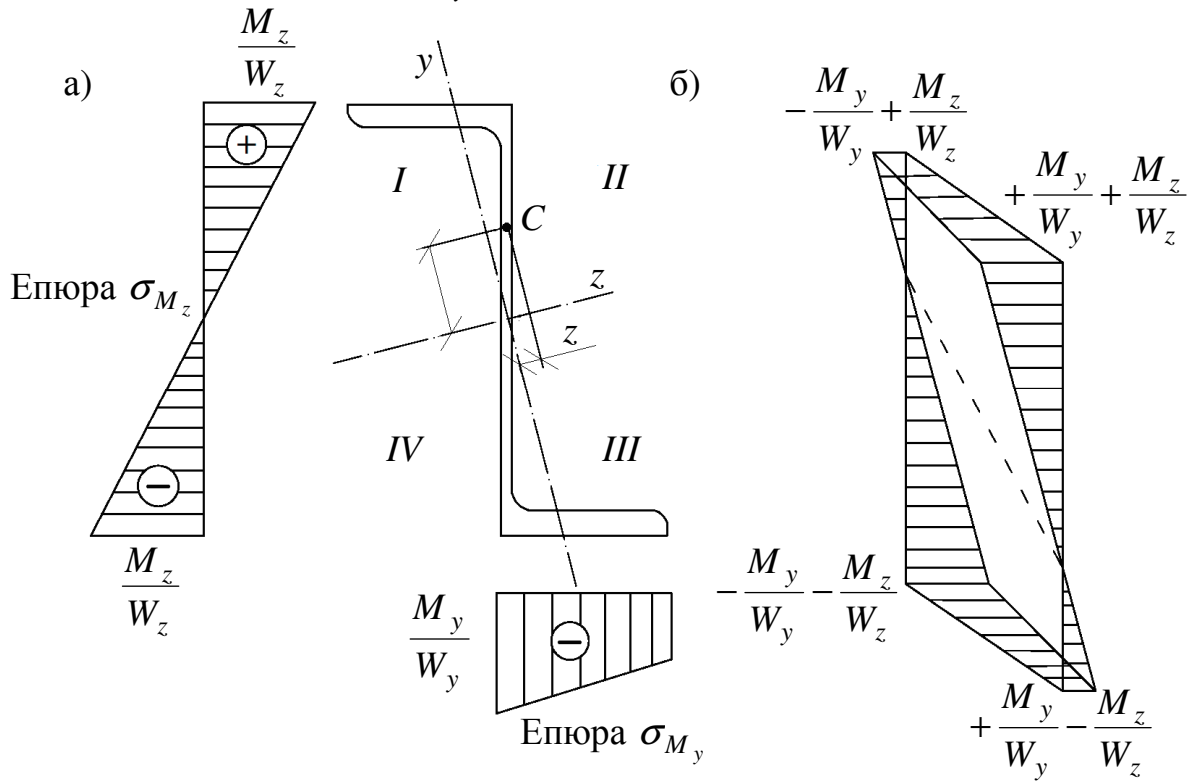


Рисунок 4.2 – Нормальні напруження в перерізі перфорованого прогону  
а – від окремих дій згинаючих моментів; б – від сумісної дії згинаючих моментів

Повний згинаючий момент  $M$  пов'язаний з його складовими  $M_z$  і  $M_y$  залежностями:

$$\begin{cases} M = \sqrt{M_z^2 + M_y^2}; \\ M_z = M \cos \alpha; \\ M_y = M \sin \alpha, \end{cases} \quad (4.2)$$

де  $\alpha$  – кут між віссю  $y$  і площиною дії повного моменту (рис. 4.3).

Поділивши третій вираз формули (4.2) на другий можна обчислити кут нахилу силової площини до головної осі інерції перерізу

$$\operatorname{tg} \alpha = |M_y / M_z|. \quad (4.3)$$

Якщо відомі величини згинаючих моментів  $M_z$  і  $M_y$ , які діють в поперечному перерізі, то повний згинаючий момент  $M$  можна обчислити за першою формулою (4.2), а абсолютне значення кута  $\alpha$  – за формулою (4.3). Положення площини дії повного моменту встановлюється з урахуванням того, що ця площина проходить через центр ваги перерізу і два квадранти, в яких обидва моменти  $M_z$  і  $M_y$  викликають напруження одного знаку. Наприклад, на ділянці 2 (див. рис. 4.1) моменти  $M_z$  від дії сили  $F_1$  і  $M_y$  від дії сили  $F_2$  викликають в точці  $C$  квадранта I появу нормальних розтягуючих напружень. Тому площина дії повного моменту  $M$  проходить через квадрант I.

Нормальні напруження  $\sigma$  за косого згину можна виразити через повний згинаючий момент  $M$ , підставивши в формулу (4.1) значення  $M_z$  і  $M_y$  з формули (4.2)

$$\sigma = \pm M \left( \frac{y \cos \alpha}{J_z} + \frac{z \sin \alpha}{J_y} \right). \quad (4.4)$$

У формулі (4.4) кут  $\alpha$  вважається додатнім, якщо площина дії повного згинаючого моменту проходить через квадранти I і III. Знак плюс перед правою частиною формули застосовується тоді, коли момент  $M$  в точці  $C$  з координатами  $y > 0$  і  $z < 0$  (див. рис. 4.3) викликає появу розтягуючих напружень.

За прямого згину нейтральна вісь проходить через центр ваги поперечного перерізу і буде перпендикулярною площині згинаючого моменту. За косого згину нормальні напруження в центрі ваги поперечного перерізу дорівнюють нулю, в чому можна легко переконатись, підставивши в

формулу (4.4) значення  $y=0$  і  $z=0$  (тобто координати центру ваги перерізу). Відповідно, за косого згину нейтральна вісь, так само як і за прямого згину, проходить через центр ваги поперечного перерізу.

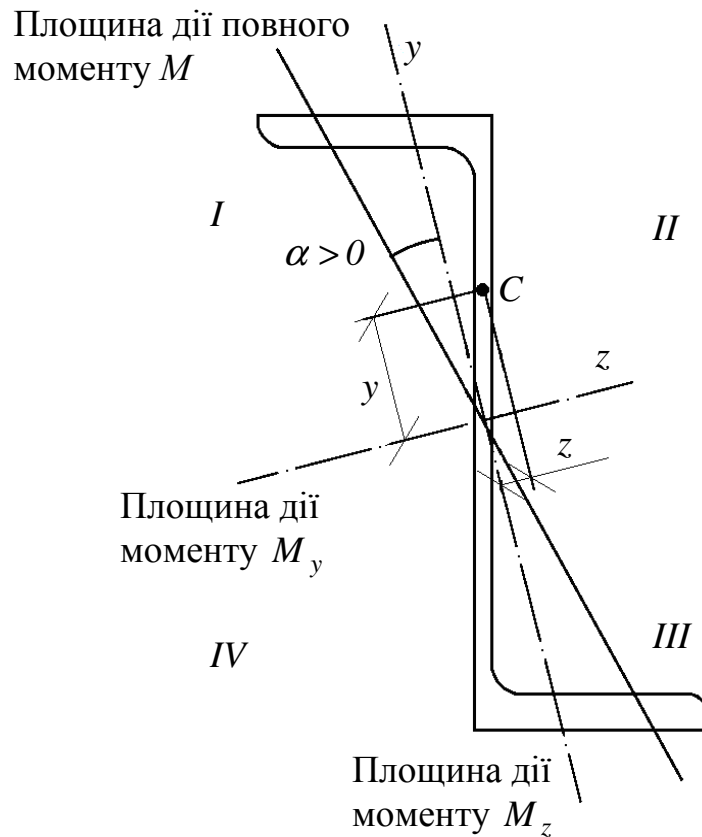


Рисунок 4.3 – Кут нахилу площини дії повного моменту  $M$

Для Z-подібного профілю положення головних осей інерції  $y$  і  $z$  не буде вертикальним і горизонтальним. Вони будуть повернуті на деякий кут, що зумовлено несиметричністю поперечного перерізу конструкції. Наприклад, для Z-подібного перфорованого прогону, виготовленого з вихідного прокатного швелера № 22У/ДСТУ 3436-96, цей кут складатиме  $14^\circ$  (рис. 4.4, а) і за кута нахилу конструкції  $0^\circ$  площина дії згинаючого моменту не буде паралельною до головної осі інерції  $y$ , тобто виникатиме косий згин. Причому, повне зовнішнє навантаження  $F$  сприйматиметься лише стінкою прогону і у верхньому поясі перфорованого профілю виникатиме крутний

момент від дії горизонтальної складової  $F_2$  (див. рис. 4.1), який спричиняє деформацію конструкції з її площини.

При збільшенні кута нахилу конструкції, кут між площиною дії повного згинаючого моменту і головною віссю інерції  $y$  поступово зменшуватиметься. Силова площина проходитиме через II і IV квадранти, тобто в роботу поступово почнуть включатися пояси прогону. За кутів нахилу  $10^\circ \dots 20^\circ$  (рис. 4.4, в, г, д) різниця між віссю  $y$  і силовою площиною буде найменшою, а поперечний переріз Z-подібного перфорованого прогону матиме найбільший момент інерції  $J_z$ . В даному випадку крутний момент також буде мати місце, хоча і не в такій мірі як за інших кутів нахилу, що призводитиме до закручування верхнього поясу прогону і, як наслідок, виникнення поперечної деформації конструкції. Тому таку конструкцію розкріплюють у поперечному напрямку в'язями і розпірками (у подальшому це буде розглянуто у п. 4.3).

На відміну від прямого згину за косого згину нейтральна вісь (нульова лінія) не буде перпендикулярною до площини дії згинаючого моменту. Це можна довести, визначивши положення нейтральної осі фрагменту стінки поперечного перерізу, який зображено на рис. 4.5, за дії згинаючого моменту  $M$ , що діє в площині, яка нахилена до головної осі інерції  $y$  під кутом  $\alpha$ .

На нейтральній осі нормальні напруження дорівнюють нулю, а тому для визначення положення цієї осі прирівняємо до нуля вираз (4.4)

$$\sigma = \pm M \left( (\cos \alpha / J_z) y + (\sin \alpha / J_y) z \right) = 0. \quad (4.5)$$

Оскільки  $M \neq 0$ , то

$$(\cos \alpha / J_z) y + (\sin \alpha / J_y) z = 0, \quad (4.6)$$

або

$$y = -\operatorname{tg} \alpha (J_z / J_y) z. \quad (4.7)$$

Рівняння нейтральної лінії (4.5) представляє собою рівняння прямої, що проходить через початок координат.

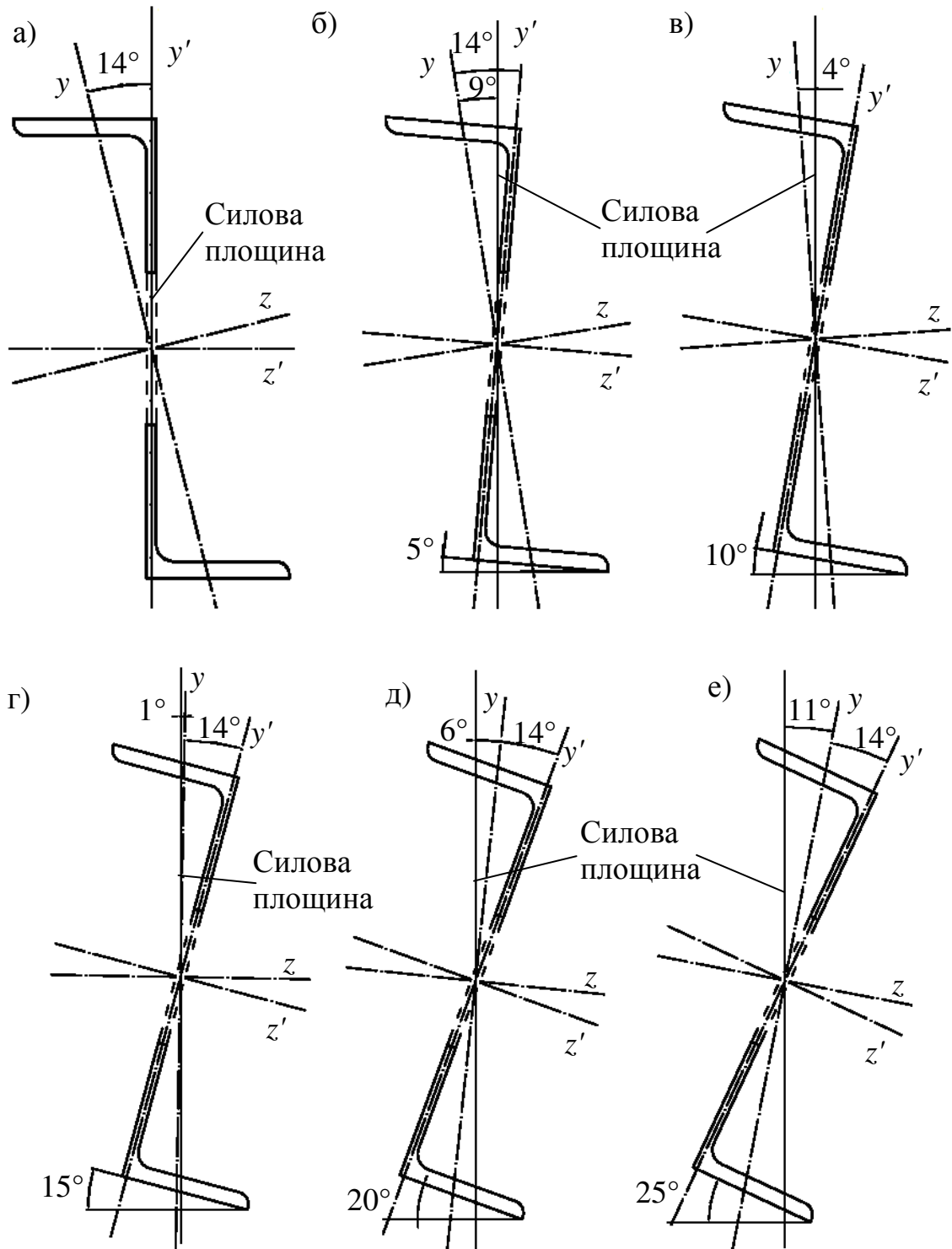


Рисунок 4.4 – Положення силової площини залежно від кута нахилу перфорованого Z-подібного профілю

а – кут нахилу  $0^\circ$ ; б – кут нахилу  $5^\circ$ ; в – кут нахилу  $10^\circ$ ; г – кут нахилу  $15^\circ$ ;  
 д – кут нахилу  $20^\circ$ ; е – кут нахилу  $25^\circ$

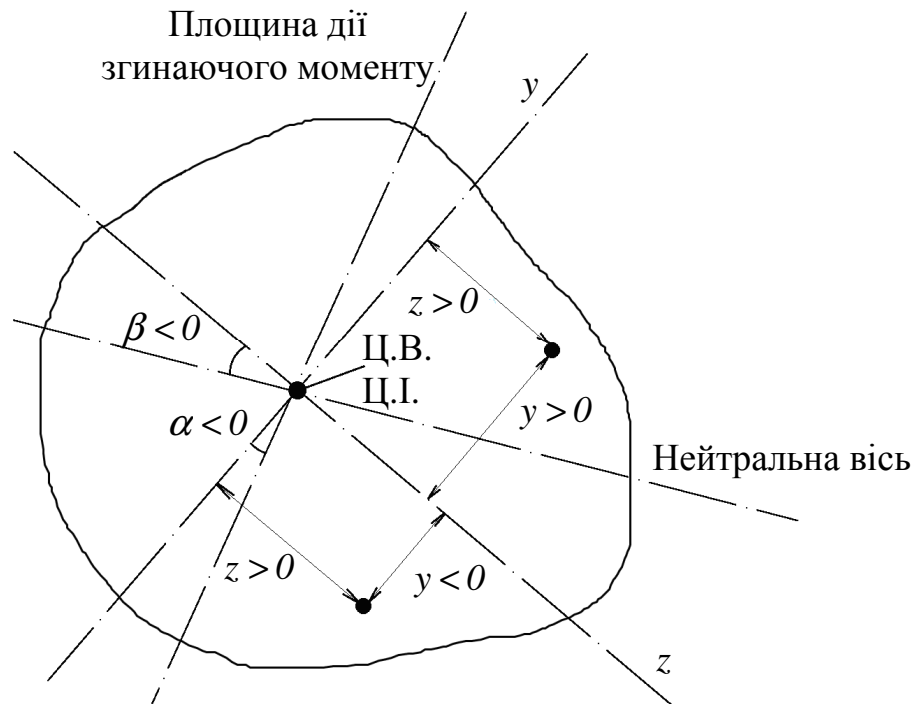


Рисунок 4.5 – Положення площини дії згинаючого моменту

Тангенс кута нахилу нейтральної осі  $\beta$  до головної осі  $z$  становить  $(-y/z)$  (див. рис. 4.5). Відповідно, на основі формули (4.5)

$$\operatorname{tg} \beta = -y/z = (J_z / J_y) \operatorname{tg} \alpha, \quad (4.8)$$

або

$$\operatorname{tg} \beta = (J_z / J_y) \operatorname{tg} \alpha. \quad (4.9)$$

Формула (4.9) фактично визначає положення нейтральної осі (нульової лінії) за косого згину. Тут  $\beta$  – кут, на який необхідно повернути вісь  $z$  за годинниковою стрілкою (якщо  $\beta > 0$ ) для того, щоб вона збігалася з нейтральною віссю;  $\alpha$  – кут, на який треба повернути вісь  $y$  за годинниковою стрілкою (якщо  $\alpha > 0$ ) для того, щоб вона збігалася з площиною дії згинаючого моменту. На рис. 4.5 зображено від'ємні значення кутів  $\alpha$  і  $\beta$ .

Формула (4.9) засвідчує, що в загальному випадку кут  $\beta$  не дорівнює куту  $\alpha$ , тобто нейтральна вісь не перпендикулярна площині дії згинаючого



моменту. Вона буде перпендикулярною до цієї площини, якщо  $J_z = J_y$ , тобто коли головні моменти інерції поперечного перерізу елемента є однаковими. Але в цьому випадку будь-які центральні осі інерції перерізу є головними і, відповідно, косий згин неможливий. З формули (4.9) також випливає, що положення нейтральної осі не залежить від величини згинаючого моменту, оскільки вона не входить у вираз тангенса кута  $\beta$ .

Якщо  $J_y = J_{max}$ , а  $J_z = J_{min}$ , то  $(J_z / J_y) < 1$ . У такому випадку за формулою (4.9)  $tg\beta < tg\alpha$  і  $\beta < \alpha$ .

Таким чином, нейтральна вісь за косого згину повернута на кут  $(\alpha - \beta)$  від осі, яка перпендикулярна до площини дії згинаючого моменту (тобто осі I–I на рис. 4.6), до осі, відносно якої момент інерції має мінімальне значення.

Нормальні напруження в кожній точці поперечного перерізу перфорованого Z-подібного прогону за косого згину, так само як і у випадку прямого згину, прямо пропорційні відстані від цієї точки до нейтральної осі. Тобто найбільші напруження, які виникають в точках поперечного перерізу, найбільш віддалені від нейтральної осі. Епюру нормальних напружень, значення яких відкладені від прямої, яка є перпендикулярною до нейтральної осі, зображено на рис. 4.7, на якому осі  $y$  і  $z$  – є головними центральними.

Точки поперечного перерізу, в яких за згину виникають найбільші за абсолютною величиною нормальні напруження (точки А і В на рис. 4.7), є небезпечними точками перерізу.

Для визначення їх положення за формулою (4.9) необхідно обчислити кут  $\beta$ , провести нейтральну вісь, а потім паралельно до неї провести дотичні лінії до контуру перерізу. Таким чином можна визначити точки перерізу, які найбільш віддалені від нейтральної лінії і які є небезпечними, а за формулами (4.1) або (4.4) обчислити напруження, які в них виникають.

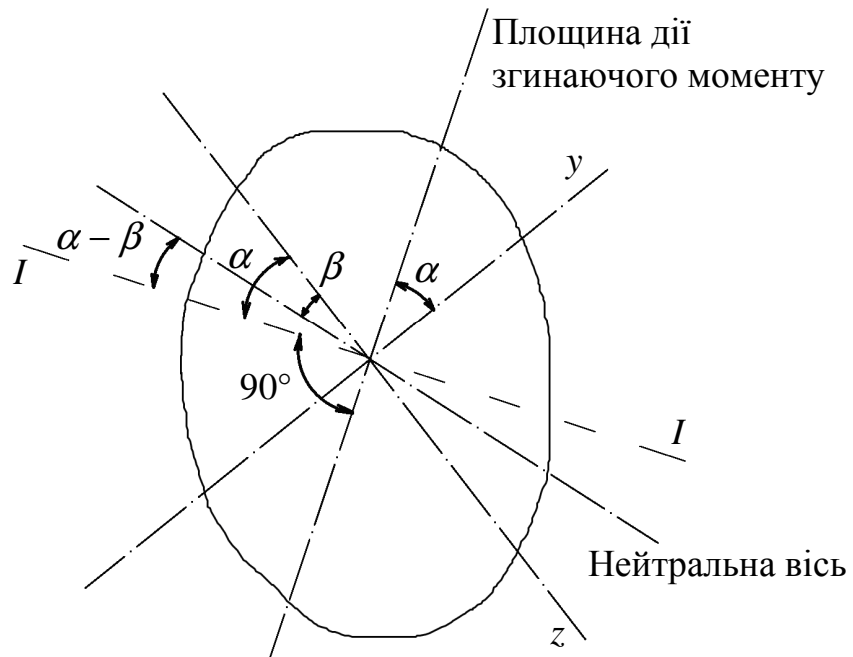


Рисунок 4.6 – Залежність між кутами нахилу  $\alpha$  і  $\beta$

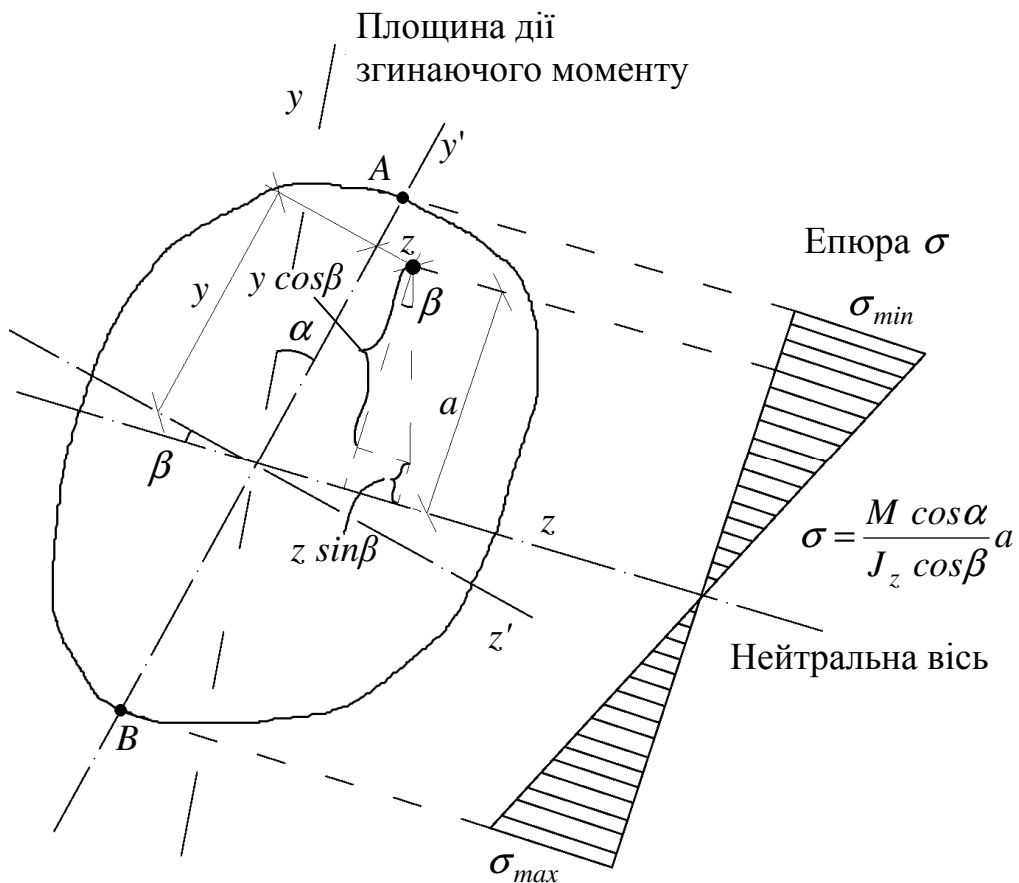


Рисунок 4.7 – Небезпечні точки перерізу з результируючими нормальними напруженнями

Отже, визначення положення нейтральної осі необхідне для знаходження небезпечних точок перерізу і подальшого розрахунку на міцність. Для деяких видів поперечних перерізів небезпечні точки можна легко знайти, не визначаючи положення нейтральної осі. Небезпечні точки і сумарні епюри нормальних напружень для перфорованого Z-подібного прогону залежно від кута нахилу конструкції зображено на рис. 4.8.

Найбільші нормальні напруження за косого згину можуть значно відрізнятися від напружень за прямого згину, який викликаний згинаючим моментом такої самої величини, але діючим в площині, яка перпендикулярна до тієї головної осі інерції, відносно якої момент інерції дорівнює  $J_{max}$ .

У деяких випадках визначити небезпечний поперечний переріз конструкції за косого згину буває складно. Небезпечним може виявитись переріз, у якому не тільки повний згинаючий момент  $M$ , але і жодний зі складових цього моменту  $M_y$  і  $M_z$  не є найбільшими. Тому часто треба робити перевірку для декількох поперечних перерізів, в яких виникають найбільші моменти  $M_y$  або  $M_z$  і в яких вони одночасно мають достатньо великі значення.

Для кутів нахилу конструкції  $0^\circ \dots 10^\circ$  площина дії повного згинаючого моменту проходить через I і III квадранти, тому що кут нахилу силової площини до головної осі  $y$  більший за нуль ( $\alpha > 0$ ), і тому кут між нульовою лінією і головною віссю  $z$  також буде більшим за нуль ( $\beta > 0$ ). Небезпечними точками будуть крайні точки стінки прогону, оскільки в цих місцях згинаючі моменти від складових повного навантаження викликають нормальні напруження однакового знаку.

За кутів нахилу  $15^\circ \dots 25^\circ$  площина дії повного згинаючого моменту проходить через II і IV квадранти, і небезпечними вже будуть точки, які знаходяться на краю полиць Z-подібного швелера. У цьому випадку кути  $\alpha$  і  $\beta$  будуть від'ємними ( $\alpha < 0$  і  $\beta < 0$ ).

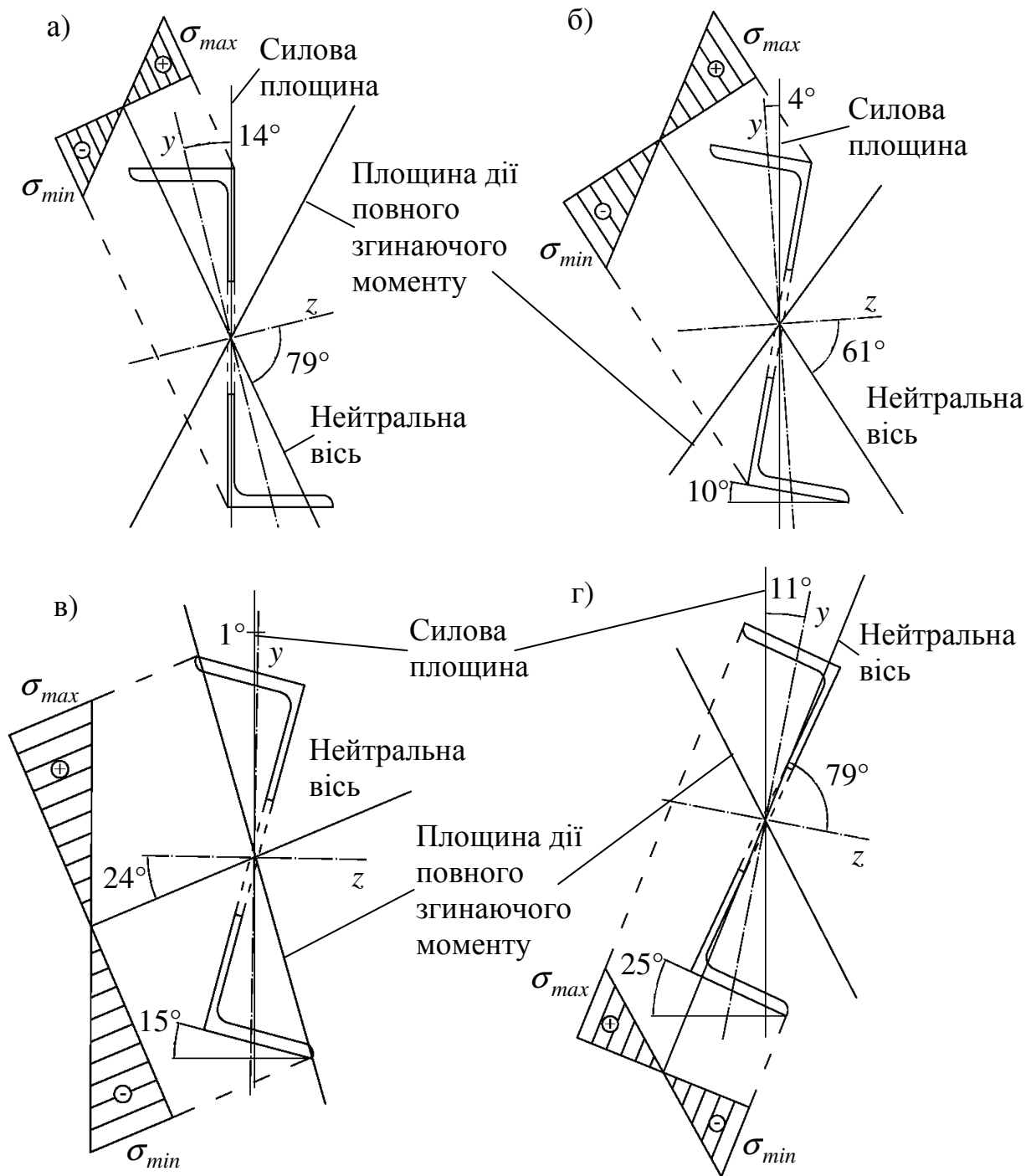


Рисунок 4.8 – Небезпечні точки перфорованого прогону залежно від кута нахилу конструкції

а – кут нахилу  $0^\circ$ ; б – кут нахилу  $10^\circ$ ; в – кут нахилу  $15^\circ$ ; г – кут нахилу  $25^\circ$ ;

## 4.2. Особливості розрахунку перфорованого прогону в умовах косого згину

Як було зазначено в пункті 4.1 за існуючими нормами проектування металевих конструкцій можна розраховувати згинальні елементи суцільного перерізу за дії сил, які не збігаються з головними осями інерції, тобто в умовах косого згину [113], або перфорованих елементів лише за прямого згину [115]. Тому використання перфорованих елементів як прогонів покриття та їх розрахунок чинними нормами не передбачено, оскільки в дійсності навіть за незначного нахилу покрівлі, конструкція прогонів працюватиме не за прямого згину.

Для розрахунку перфорованих прогонів в умовах косого згину пропонується взяти за основу існуючі методики розрахунку перфорованих [115] і згинальних елементів [113]. Для визначення напружень у розрахункових перерізах перфорованого бісталевого елемента з несиметричними по висоті поясами на 1-й і 3-й ділянках (рис. 4.9) для балок 1-го класу, відповідно до норм [113], пропонується використовувати формули:

верхній пояс, точка 1

$$\sigma_{sup1} = \frac{M_z h_1}{J_z} + \frac{Q_{sup1} a}{2 W_{sup,max}} \pm \frac{M_y}{W_y} \leq R_y \gamma_c; \quad (4.10)$$

верхній пояс, точка 2

$$\sigma_{sup2} = \frac{M_z d_1}{J_z} + \frac{Q_{sup2} a}{2 W_{sup,min}} \pm \frac{M_y}{W_y} \leq \frac{R_u \gamma_c}{\gamma_u}; \quad (4.11)$$

нижній пояс, точка 3

$$\sigma_{inf3} = \frac{M_z h_2}{J_z} + \frac{Q_{inf1} a}{2 W_{inf,max}} \pm \frac{M_y}{W_y} \leq R_y \gamma_c; \quad (4.12)$$

нижній пояс, точка 4

$$\sigma_{inf4} = \frac{M_z d_2}{J_z} + \frac{Q_{inf2} a}{2 W_{inf,min}} \pm \frac{M_y}{W_y} \leq \frac{R_u \gamma_c}{\gamma_u}, \quad (4.13)$$

де  $M_z = M \cos \alpha$ ;  $M_y = M \sin \alpha$  – згинаючі моменти відповідно в площині та з площини дії зовнішнього навантаження;  $h_1$ ;  $d_1$ ;  $h_2$ ;  $d_2$  – відстані від головних осей інерції до точки, що розглядається;  $J_z$  – момент інерції у відповідному перерізі;  $W_{sup,max}$ ;  $W_{sup,min}$ ;  $W_{inf,max}$ ;  $W_{inf,min}$  – максимальні та мінімальні моменти опорів перерізів верхнього і нижнього поясів;  $R_y$ ,  $R_u$  – відповідно розрахункові опори сталі на межі текучості і межі міцності;  $\gamma_c$ ,  $\gamma_u$  – відповідно коефіцієнти умов роботи і коефіцієнт надійності;  $Q_{sup1}$ ;  $Q_{sup2}$ ;  $Q_{inf1}$ ;  $Q_{inf2}$  – відповідні поперечні зусилля, які сприймаються тавровими поясами і визначаються пропорційно їх жорсткостям, тобто приймаються коефіцієнти розподілу:

$$\text{для верхнього пояса} \quad \alpha_{sup} = \frac{J_{sup}}{J_{sup} + J_{inf}}; \quad (4.14)$$

$$\text{для нижнього пояса} \quad \alpha_{inf} = 1 - \alpha_{sup}, \quad (4.15)$$

де  $J_{sup}$ ;  $J_{inf}$  – моменти інерції перерізів верхнього і нижнього поясів.

Тоді поперечні сили в поясах

$$\begin{cases} Q_{sup1} = \alpha_{sup} Q_1; \\ Q_{inf1} = \alpha_{inf} Q_1; \end{cases} \begin{cases} Q_{sup2} = \alpha_{sup} Q_2; \\ Q_{inf2} = \alpha_{inf} Q_2, \end{cases} \quad (4.16)$$

де  $Q_1$ ;  $Q_2$  – поперечні зусилля в перерізі.

Для визначення напружень на ділянці 2 використовується формула

$$0,87 \sqrt{\sigma_z^2 - \sigma_z \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{zy}^2} \leq R_y \gamma_c, \quad (4.17)$$

де  $\sigma_z = \frac{M_z h_1}{J_z} + \frac{Q_{sup1} a}{2 W_{sup,max}}$  – нормальні напруження в серединній площині

стілки, спрямовані паралельно до поздовжньої осі конструкції;  $\sigma_y = \frac{M_y}{W_y}$  –

теж саме, спрямовані перпендикулярно до поздовжньої осі конструкції;

$\tau_{zy} = \frac{Q_y S}{J_z t_w}$  – дотичні напруження у розглядуваній точці стінки конструкції;

$R_y$  – розрахунковий опір сталі;  $\gamma_c$  – коефіцієнт умов роботи конструкції.

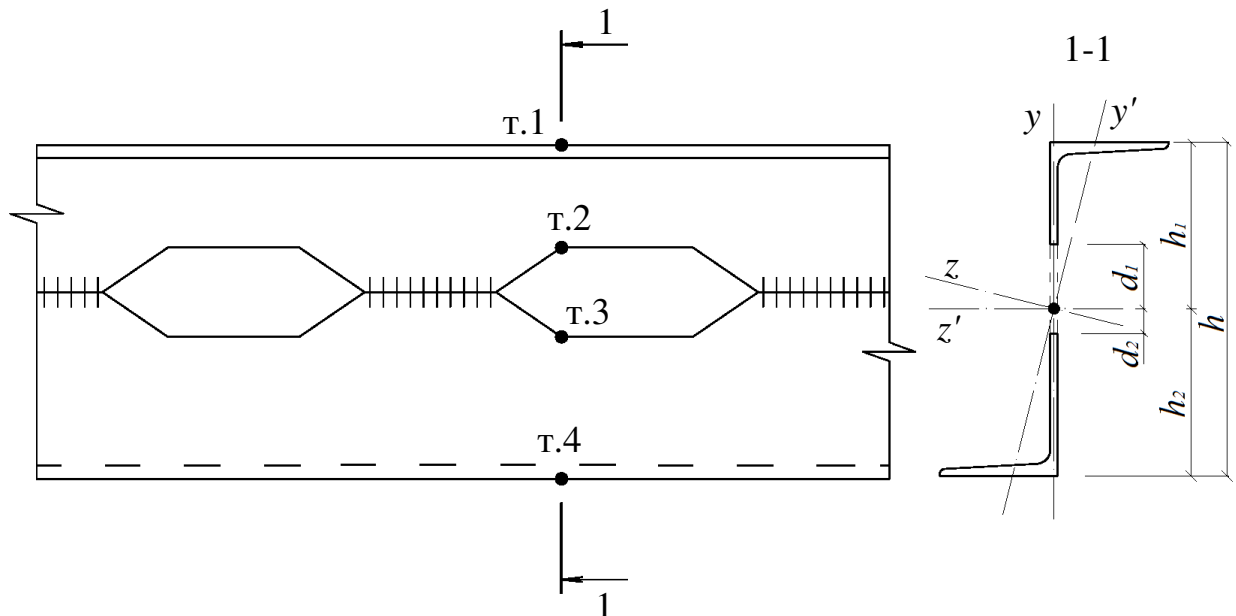


Рисунок 4.9 – Схема ділянки прогону з перфорованою стінкою

Розрахунок на міцність розрізних балок 2-го і 3-го класів, відповідно до норм [113], пропонується виконувати за формулами:

$$\text{точка 1} \quad \sigma_1 = \frac{M_z h_1}{c_x \beta J_z} + \frac{Q_{sup1} a}{2 W_{sup, max}} \pm \frac{M_y}{c_y W_y} \leq R_y \gamma_c; \quad (4.18)$$

$$\text{точка 2} \quad \sigma_2 = \frac{M_z d_1}{c_x \beta J_z} + \frac{Q_{sup2} a}{2 W_{sup, min}} \pm \frac{M_y}{c_y W_y} \leq R_y \gamma_c; \quad (4.19)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт, який приймається таким, що дорівнює: якщо  $\tau_y \leq 0,5R_s$ ,

$\beta = 1$ ; якщо  $0,5R_s < \tau_y \leq 0,9R_s$

$$\beta = 1,0 - \frac{0,2}{\alpha_f + 0,25} \left( \frac{\tau_y}{R_s} \right)^4, \quad (4.20)$$

де  $\alpha_f = A_f / A_w$  – відношення площ поперечних перерізів пояса і стінки;  $c_x$  і  $c_y$  – коефіцієнти, значення яких приймаються для балок 3-го класу згідно з табл. Н1 додатку Н [113], а для балок 2-го класу в інтервалі між 1,0 і значеннями  $c_x$  і  $c_y$ , обчисленими за табл. Н1 додатку Н [113];  $R_s$  – розрахунковий опір зсуву.

На рис. 4.10 і 4.11 зображені графіки несучої здатності перфорованих прогонів, які визначалися за граничними станами I-ої та II-ої груп. Усі відповідні графіки є фактично паралельними один одному, що свідчить про однакові залежності у зміні зовнішнього навантаження залежно від коефіцієнта розвитку вихідного профілю.

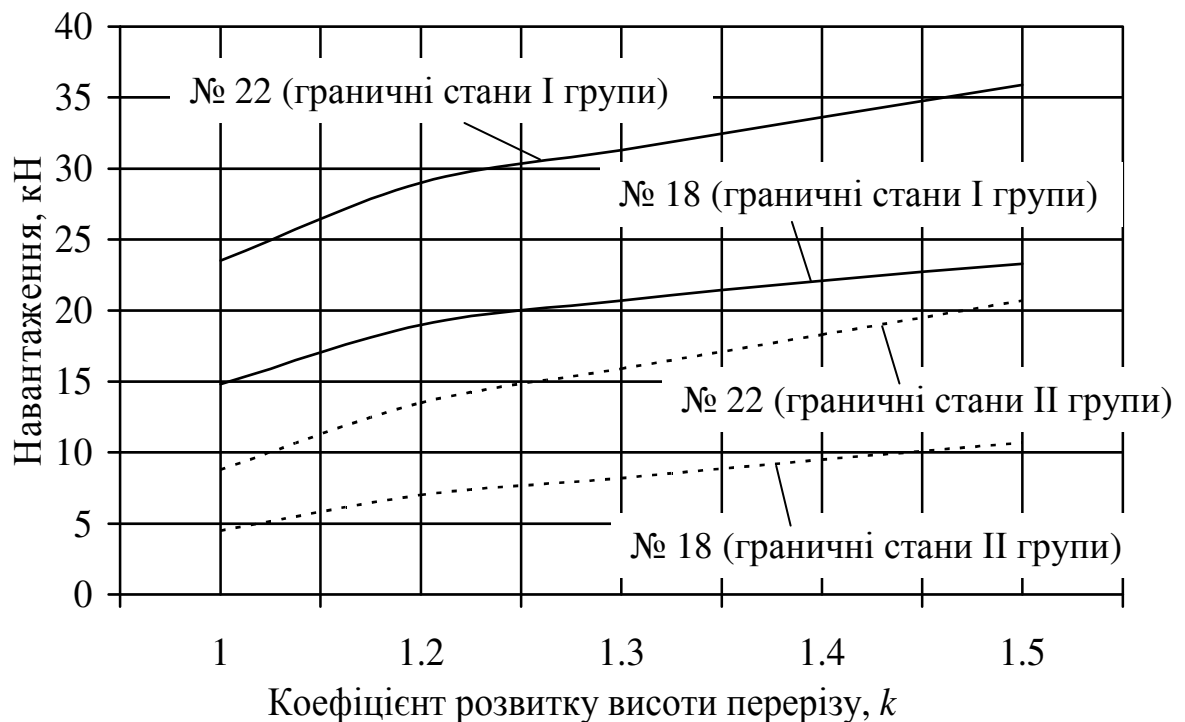


Рисунок 4.10 – Несуча здатність перфорованого прогону за граничними станами I і II груп залежно від коефіцієнта розвитку висоти перерізу  $k$  для вихідних швелерів № 18 і № 22

Використовуючи формули існуючих методик розрахунку перфорованих елементів (розділ 1) і запропонованих формул (4.10...4.13 і 4.18...4.19), було отримано теоретичні значення нормальних напружень у характерних



перерізах перфорованого прогону на 3-ох ділянках для кутів нахилу конструкції  $0^\circ \dots 25^\circ$ , які порівнювалися з теоретичними результатами, обчисленими у ПК „Ліра”, і з даними, отриманими експериментально. Отримані дані зведено у табл. Б.1, дод. Б.

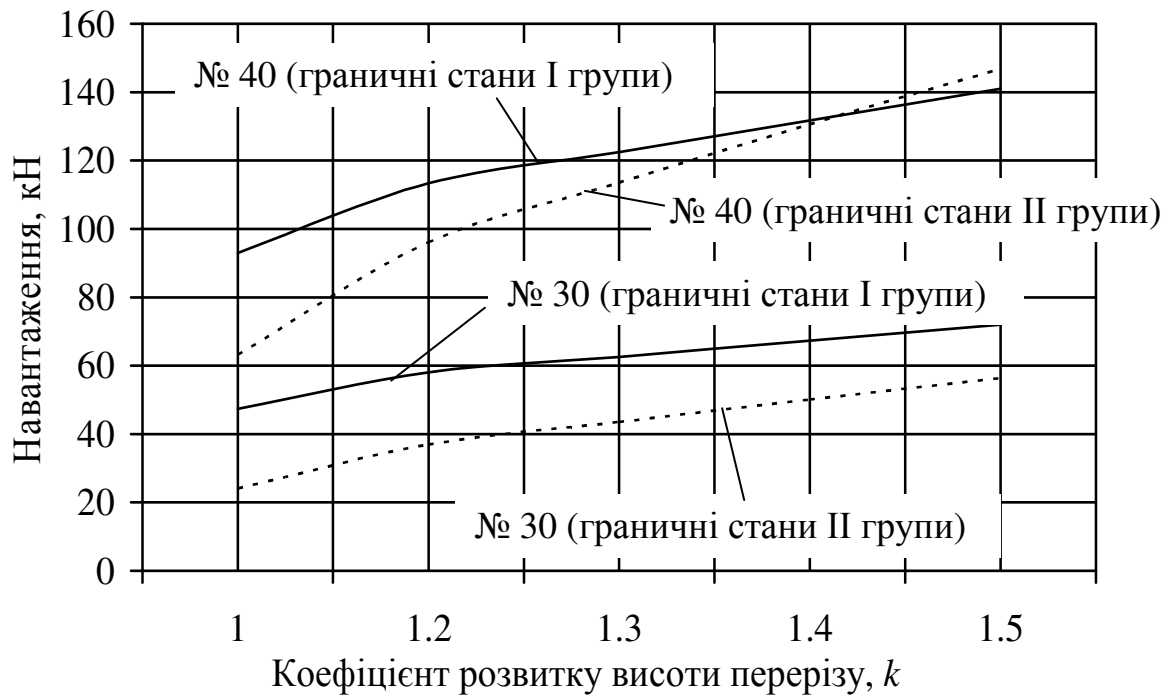


Рисунок 4.11 – Несуча здатність перфорованого прогону за граничними станами I і II груп залежно від коефіцієнта розвитку вихідного швелера № 30 і № 40

На рис. 4.12 і 4.13 зображені залежності несучих здатностей перфорованих прогонів від коефіцієнта розвитку вихідного профілю  $k$ . Ця крива має чітко виражену параболічну залежність, що свідчить про непропорційне зростання несучої здатності конструкції.

Графіки 4.14 ілюструють різницю між несучими здатностями, які визначаються з урахуванням і без урахування поперечних деформацій конструкції. Всі вони є паралельні між собою, що свідчить про однакову залежність зміни навантаження. Така кривизна лінії (зображена пунктирною лінією) несучої здатності, яка визначалася з урахуванням поперечної деформації перфорованої конструкції пояснюється значними відхиленнями

силової площини від головних осей інерції Z-подібного профілю і тому несуча здатність буде невеликою. За кутів нахилу конструкції  $15^\circ \dots 20^\circ$ , коли кут між головними осями інерції і силовою площиною найменший, в конструкції виникатиме чистий згин, за якого несуча здатність і буде найбільшою.

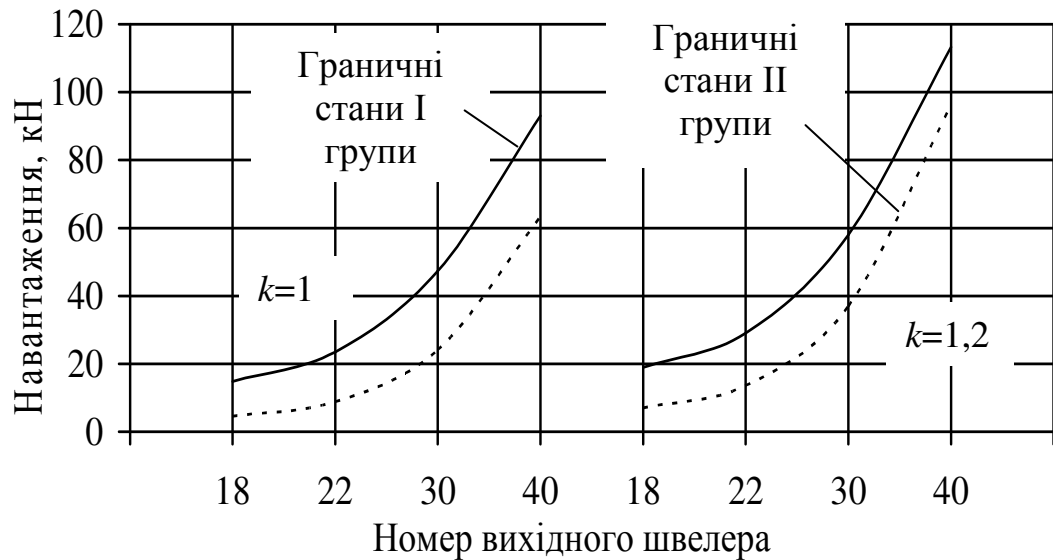


Рисунок 4.12 – Несуча здатність перфорованого прогону залежно від номера вихідного швелера, якщо  $k = 1$  і  $k = 1,2$

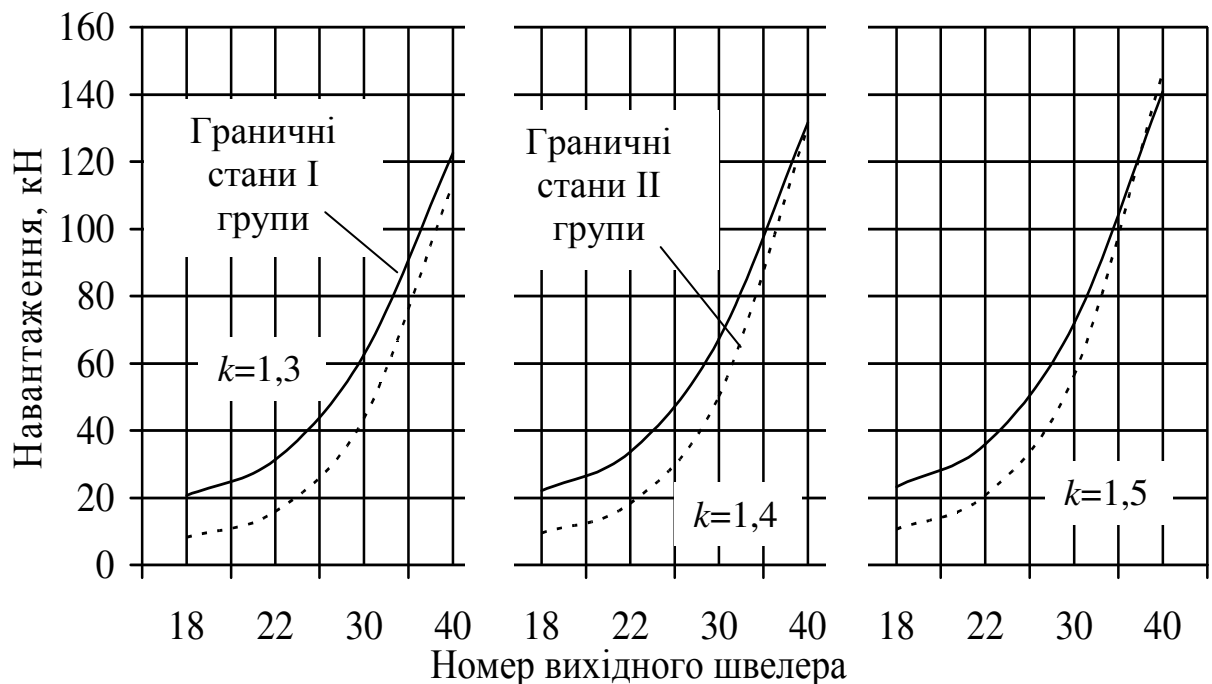


Рисунок 4.13 – Несуча здатність перфорованого прогону залежно від номера вихідного швелера, якщо  $k = 1,3$ ,  $k = 1,4$  і  $k = 1,5$

Якщо ж визначати граничне навантаження на конструкцію без урахування поперечної деформації, тобто так як вона працює в дійсності, то крива його зміни буде майже прямою, оскільки значення зміни кута між головними осями інерції і силовою площиною майже не впливає на зміну граничного навантаження.

На рис. 4.14 показані графіки лише для деяких вихідних профілів і для деяких коефіцієнтів розвитку висоти перерізу  $k$ , оскільки для всіх інших профілів графіки залежності є такими самими.

На рис. 4.15 і 4.16 зображено графіки зміни нормальних напружень у перерізах перфорованого прогону залежно від кута нахилу конструкції. Залежності є майже лінійними, оскільки і графіки зміни навантаження також є лінійними. Дані графіки наведено лише для одного профілю і кількох коефіцієнтів розвитку перерізу  $k$ , оскільки для інших прокатних швелерів і для різних коефіцієнтів  $k$  криві зміни нормальних напружень мають таку саму лінійну залежність.

Порівнюючи нормальні напруження у характерних перерізах на трьох ділянках прогону для різних коефіцієнтів  $k$  і для різних кутів нахилу конструкції (рис. 4.17, а, б), встановлено, що має місце концентрація напружень у кутах отворів. Причому для всіх профілів концентрація напружень завжди присутня на 1-й ділянці, а з подальшим збільшенням коефіцієнта  $k$  концентрація починає виникати і на ділянці 2.

Криві прогинів профілю залежно від кута нахилу конструкції представлено на рис. 4.18 а, б. Найнижчі прогини спостерігаються за кута нахилу конструкції  $15^\circ$ , оскільки кут між головними осями інерції і силовою площиною є найменшим.

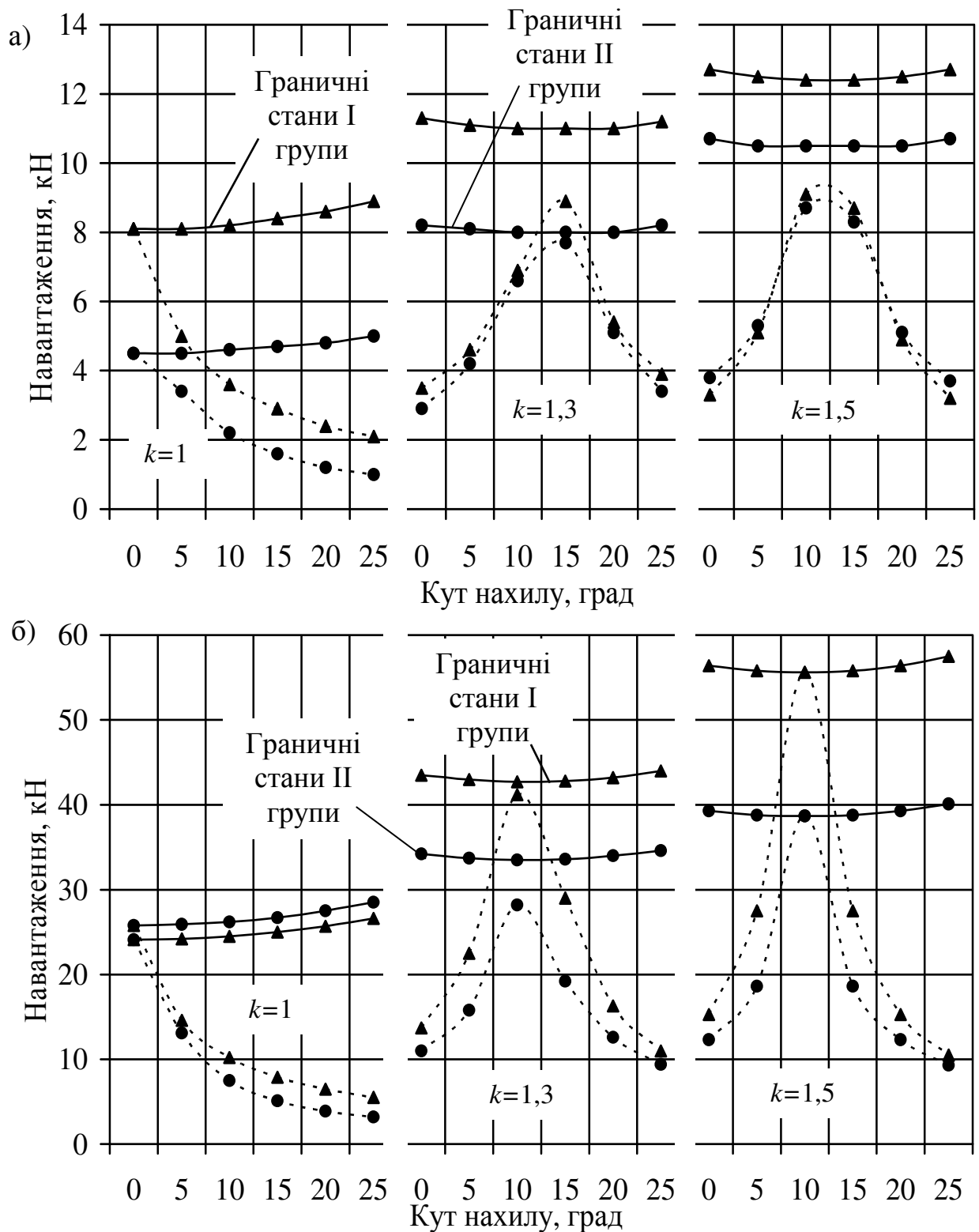


Рисунок 4.14 – Несучі здатності перфорованих прогонів з урахуванням поперечних деформацій і без них, якщо  $k = 1$ ,  $k = 1,3$  і  $k = 1,5$  для вихідного профілю:

а – № 18; б – № 30

(пунктирною – з урахуванням деформацій; суцільною – без урахування)

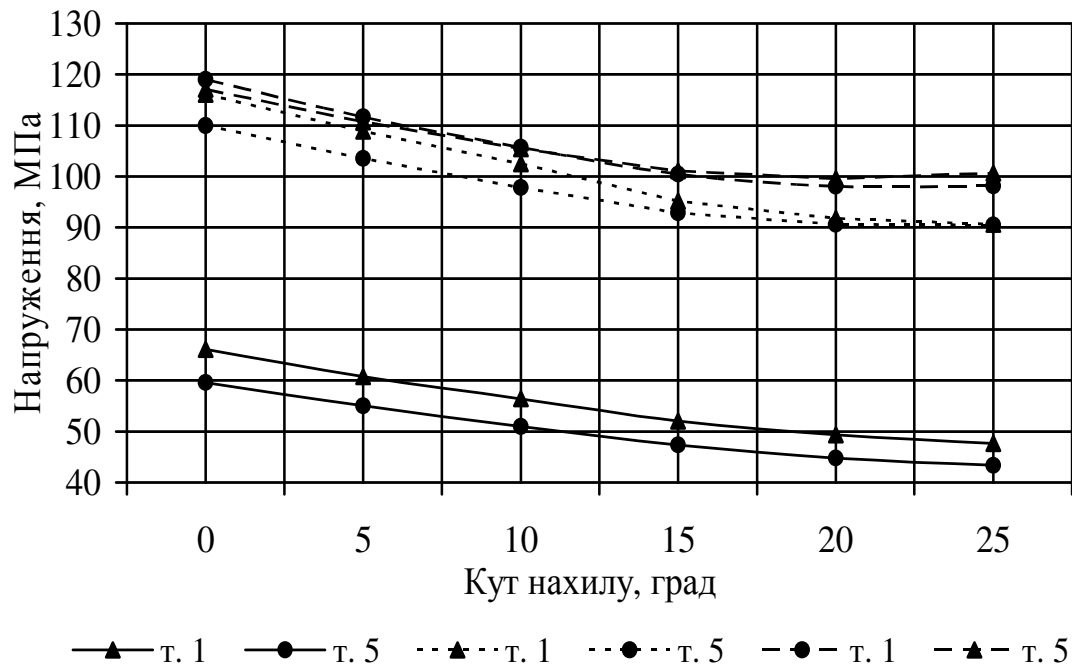


Рисунок 4.15 – Нормальні напруження залежно від кута нахилу конструкції для вихідного профілю № 18, якщо  $k = 1$

( ——— — ділянка 1; ..... — ділянка 2; - - - - - — ділянка 3)

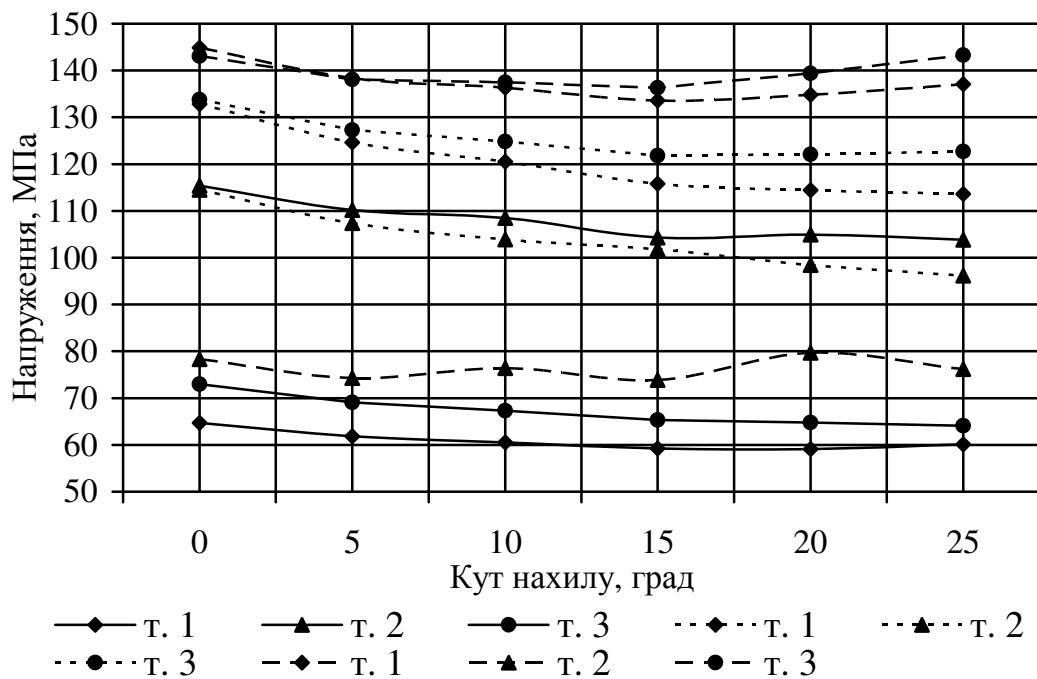


Рисунок 4.16 – Нормальні напруження у перфорованих прогонах залежно від кута нахилу конструкції для вихідного профілю № 18, якщо  $k = 1,3$

( ——— — ділянка 1; ..... — ділянка 2; - - - - - — ділянка 3)

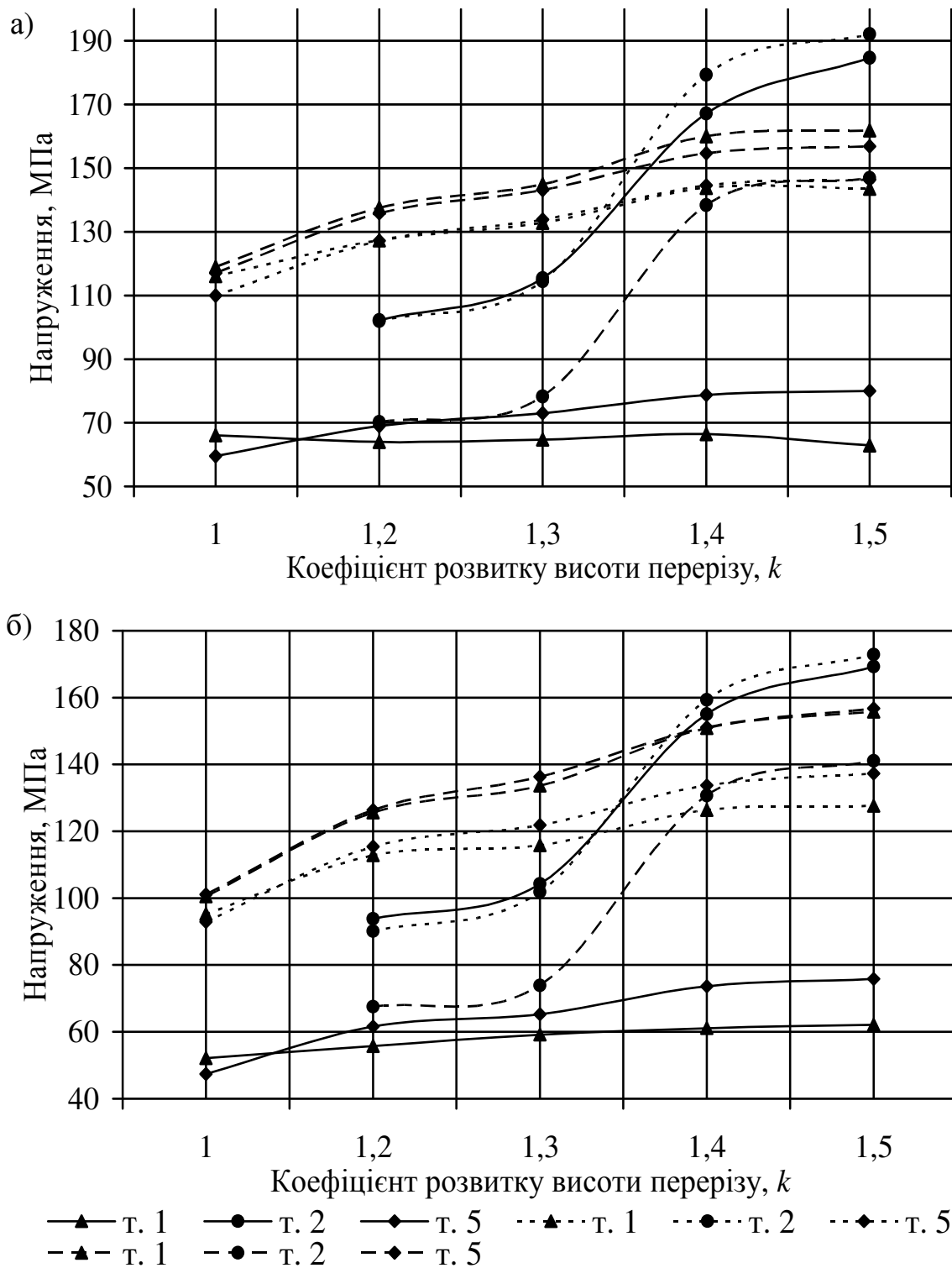


Рисунок 4.17 – Нормальні напруження у перфорованих прогонах залежно від коефіцієнта  $k$  для профілю № 18

а – кут нахилу  $0^\circ$ ; б – кут нахилу  $15^\circ$

( ——— – ділянка 1; - - - - - – ділянка 2; - - - - - – ділянка 3)

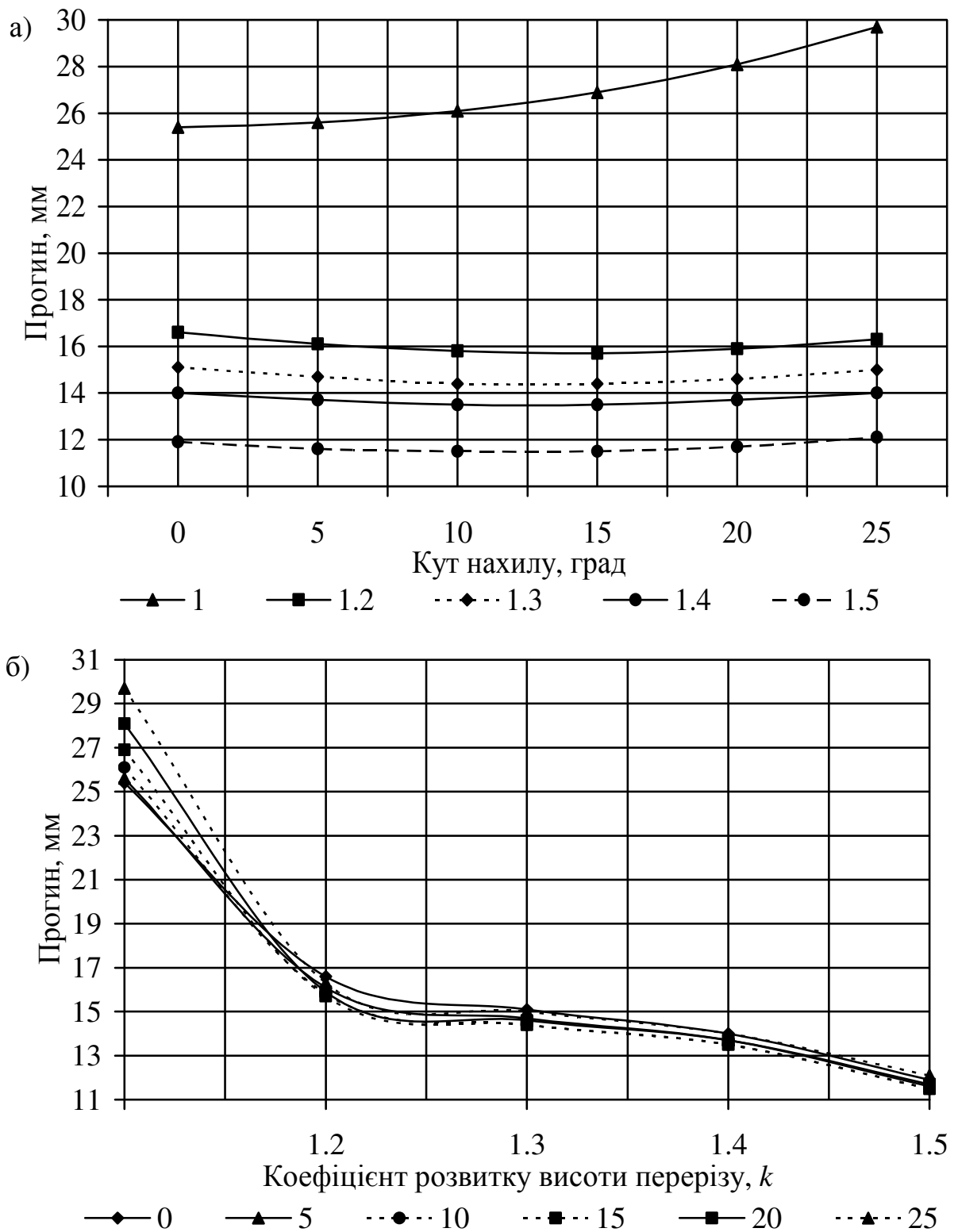


Рисунок 4.18 – Прогини перфорованих прогонів для вихідного профілю №18  
залежно

а – від кута нахилу конструкції; б – від коефіцієнта розвитку вихідного профілю

#### 4.3. Деформативність конструкції перфорованого Z-подібного профілю

Оскільки косий згин представляє собою поєднання двох прямих згинів, то переміщення у цьому випадку можуть бути визначені тими самими методами, що і для прямого згину. Для цього усі навантаження розкладаються на складові, які діють у головних площинах  $yx$  і  $zx$ , а потім окремо визначаються переміщення у площині  $yx$  від складових, що діють у цій площині, і окремо – у площині  $zx$ .

Якщо за косого згину зовнішні сили, що діють на переріз, розміщені в одній площині, то його вісь деформування (пружна лінія) представляє собою плоску криву, яка розміщена не в площині дії сил. Це можна побачити на прикладі перфорованого Z-подібного прогону, до якого прикладене зовнішнє навантаження  $F$  (рис. 4.19).

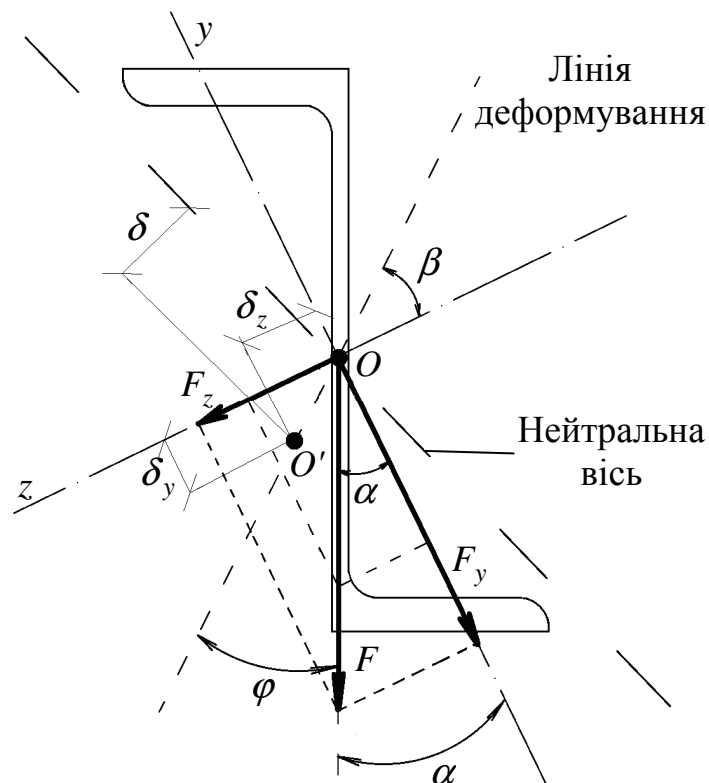


Рисунок 4.19 – Лінія деформування Z-подібного профіля



Складові цієї сили, що діють в площинах  $yx$  і  $zx$ , становлять  $F_y = F \cos \alpha$  і  $F_z = F \sin \alpha$ . Переміщення  $\delta_y$  і  $\delta_z$  будь-якої точки осі прогону в напрямку осей  $y$  і  $z$ , які викликані силами  $F_y$  і  $F_z$ , складають

$$\begin{cases} \delta_y = (F_y / EJ_z) f(x); \\ \delta_z = (F_z / EJ_y) f(x), \end{cases} \quad (4.21)$$

де  $f(x)$  – деяка функція абсциси  $x$  точки, що розглядається.

Після деформації центр ваги  $O$  будь-якого поперечного перерізу зміститься на величину  $\delta_y$  в напрямку осі  $y$  і на величину  $\delta_z$  в напрямку осі  $z$ , тобто він зміститься в точку  $O'$  (див. рис. 4.19). Кут  $\varphi$  нахилу прямої  $O-O'$  до площини прикладання зовнішнього навантаження  $F$  можна знайти з виразу

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\delta_z}{\delta_y} = \frac{(F_z / EJ_y) f(x)}{(F_y / EJ_z) f(x)} = \frac{J_z F_z}{J_y F_y} = \frac{J_z F \sin \alpha}{J_y F \cos \alpha} = \frac{J_z}{J_y} \operatorname{tg} \alpha. \quad (4.22)$$

На підставі формули (4.22)

$$(J_z / J_y) \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \varphi. \quad (4.23)$$

Тому

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \beta \quad \text{і} \quad \varphi = \beta. \quad (4.24)$$

Таким чином, переміщення точок осі конструкції перфорованого прогону Z-подібного профілю відбувається в площині, яка перпендикулярна до нейтральної осі і яка не збігається з площиною дії навантаження.

У випадку косого згину, коли зовнішні сили не розміщені в одній площині, напрямок повного прогину в кожному поперечному перерізі перфорованого профілю не є перпендикулярним до нейтральної лінії.

Якщо переміщення  $\delta_y$  і  $\delta_z$  точки осі елемента в площинах  $yx$  і  $zx$  відомі, то повне переміщення  $\delta$  в цій точці, а також кут  $\varphi$  між напрямком  $\delta$  і віссю  $y$  визначають за формулами

$$\delta = \sqrt{\delta_y^2 + \delta_z^2} \quad \text{і} \quad \operatorname{tg} \varphi = \left| \frac{\delta_z}{\delta_y} \right|. \quad (4.25)$$

Втрата загальної стійкості перфорованих елементів виявляється у порушенні плоскої форми згину зі зміщенням перерізу конструкції в напрямку ухилу покрівлі за одночасного повороту її вертикальної осі (рис. 4.20, а, б). Наявність горизонтальних в'язей перешкоджає таким переміщенням і виникненню крутних деформацій, тобто забезпечує загальну стійкість конструкції. При чому, конструкція перфорованого прогону, яка закріплена зі своєї площини буде працювати як за чистого косого згину, тобто в ній не виникатимуть деформації вздовж поперечної осі інерції (рис. 4.20, в, г).

Загальна стійкість згинальних елементів, матеріал яких працює в області пружних деформацій, завжди забезпечена і не потребує перевірки, якщо стиснутий пояс закріплений від горизонтальних переміщень в окремих точках, при цьому відношення розрахункової довжини пояса  $l_{ef}$  до ширини стиснутого пояса  $b_f$  не перевищує значень отриманих за формулою [113]

$$\frac{l_{ef}}{b_f} = \left[ 0,35 + 0,0032 \frac{b_f}{t_f} + \left( 0,76 - 0,02 \frac{b_f}{t_f} \right) \frac{b_f}{h_0} \right] \sqrt{\frac{E}{R_y}}. \quad (4.26)$$

За формулою (4.26) можна обчислити максимально допустиму відстань між точками закріплення поперечних в'язей, яка для перфорованого Z-подібного прогону, виготовленого з прокатного швелера №22У/ДСТУ 3436–96, становить  $l_{ef} = 1,3$  м. В розрахунках та в експерименті ця відстань була прийнята 1,2 м, що дорівнює стандартній ширині панелі типу „сендвич”, закріпленої лише по краях.

Для дослідження деформованого стану конструкції прогону за різних кроків закріплення в'язей (рис. 4.21...4.23) у ПК „Ліра” було проведено розрахунки і порівняння нормальних напружень і деформацій у характерних перерізах перфорованого елемента, які було зведено в табл. 4.1.

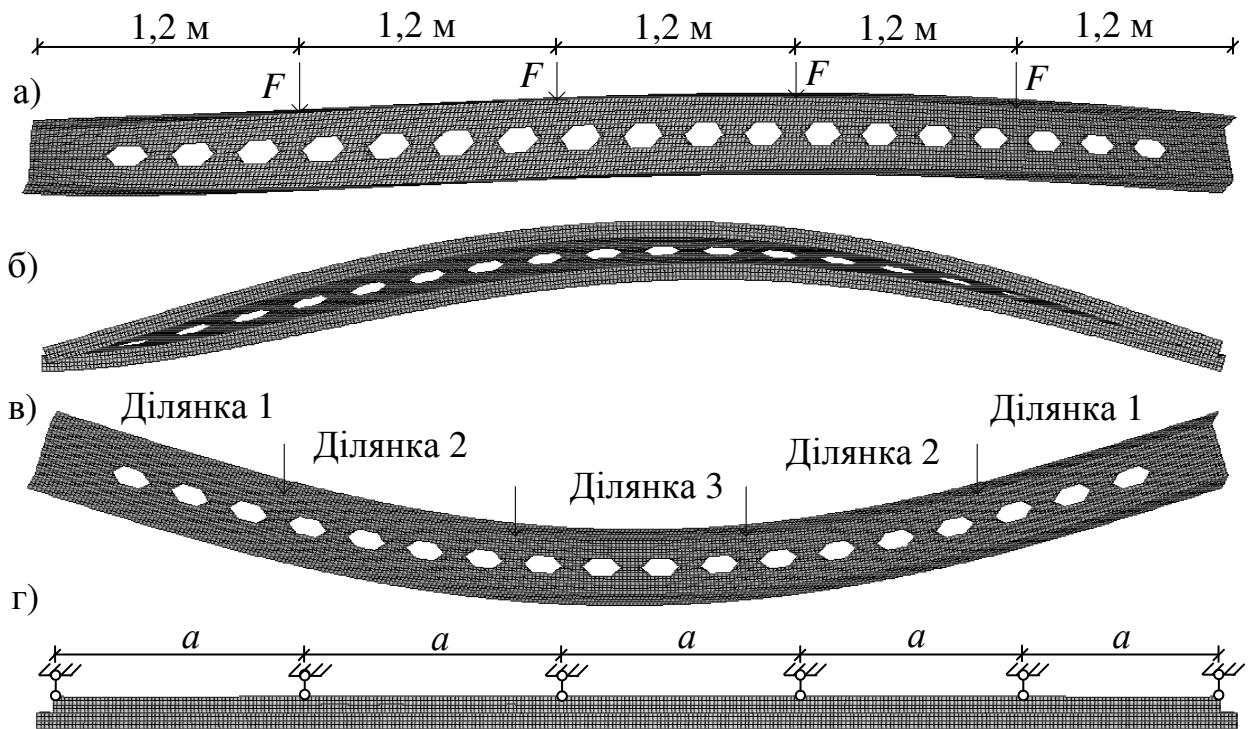


Рисунок 4.20 – Вплив поперечних в'язей на деформаційну схему перфорованого прогону

а, б – деформаційна схема конструкції відповідно спереду і зверху без поперечного розкріплення; в, г – теж саме, з поперечними в'язями

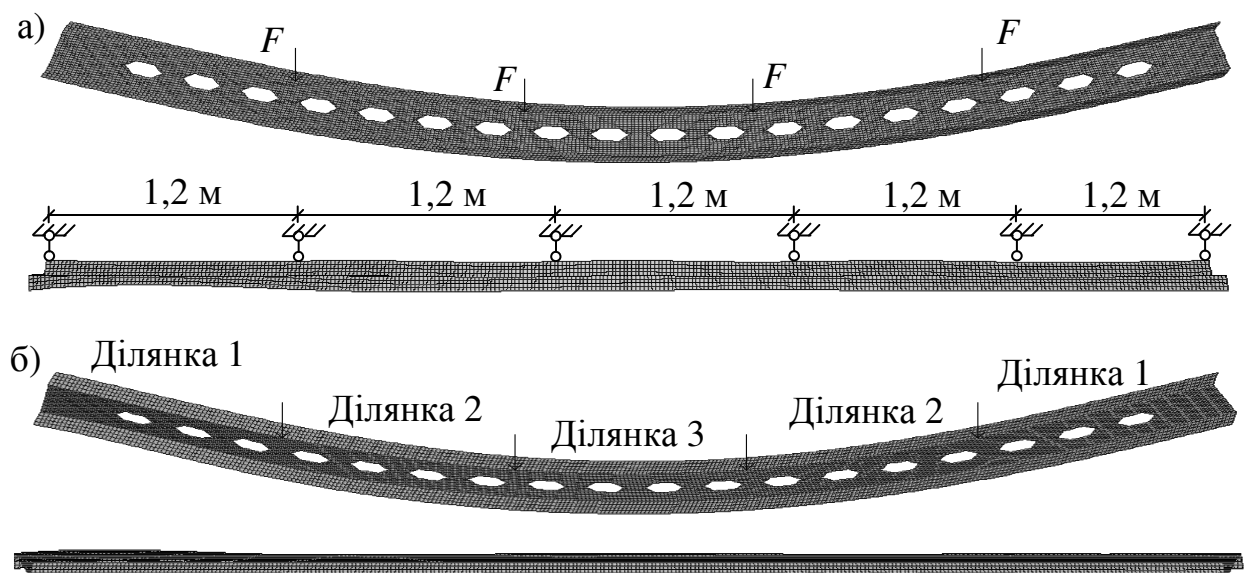


Рисунок 4.21 – Схема деформування перфорованого прогону із площини конструкції, якщо крок закріплення 1,2 м  
а – кут нахилу  $0^\circ$ ; б – кут нахилу  $20^\circ$

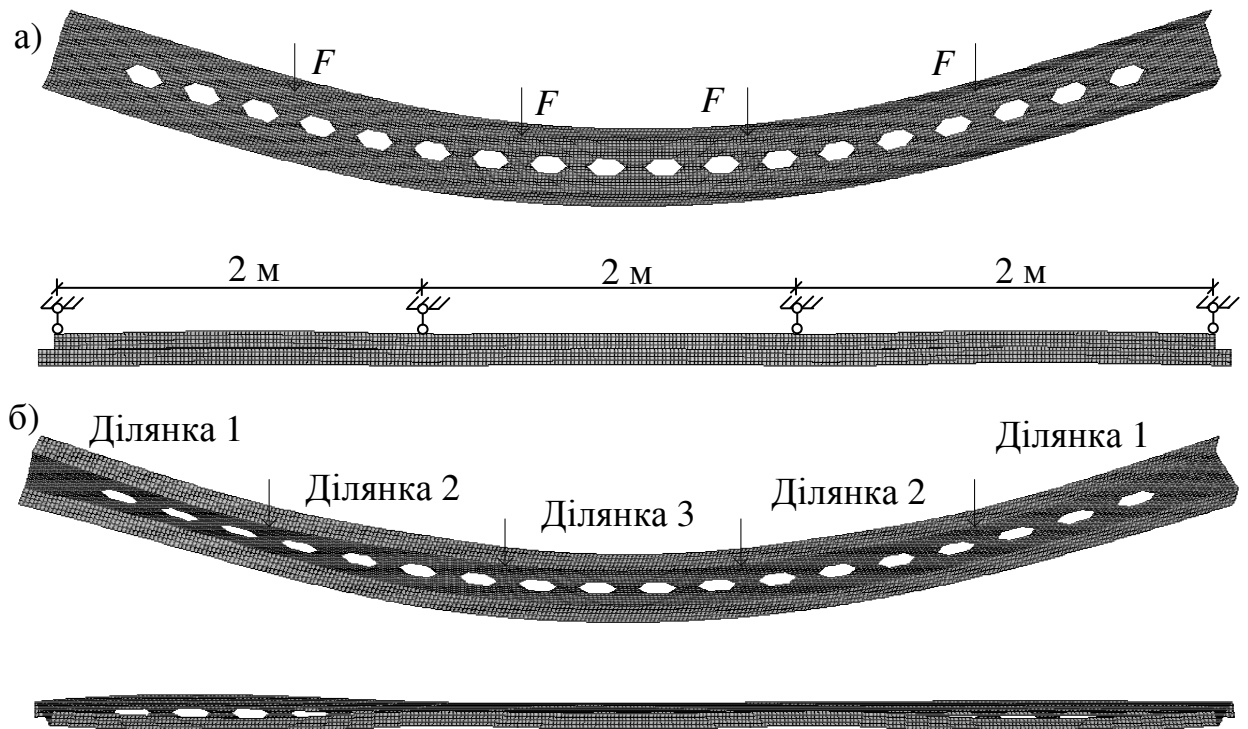


Рисунок 4.22 – Схема деформування перфорованого прогону із площини конструкції, якщо крок закріплення 2 м

а – кут нахилу  $0^\circ$ ; б – кут нахилу  $20^\circ$

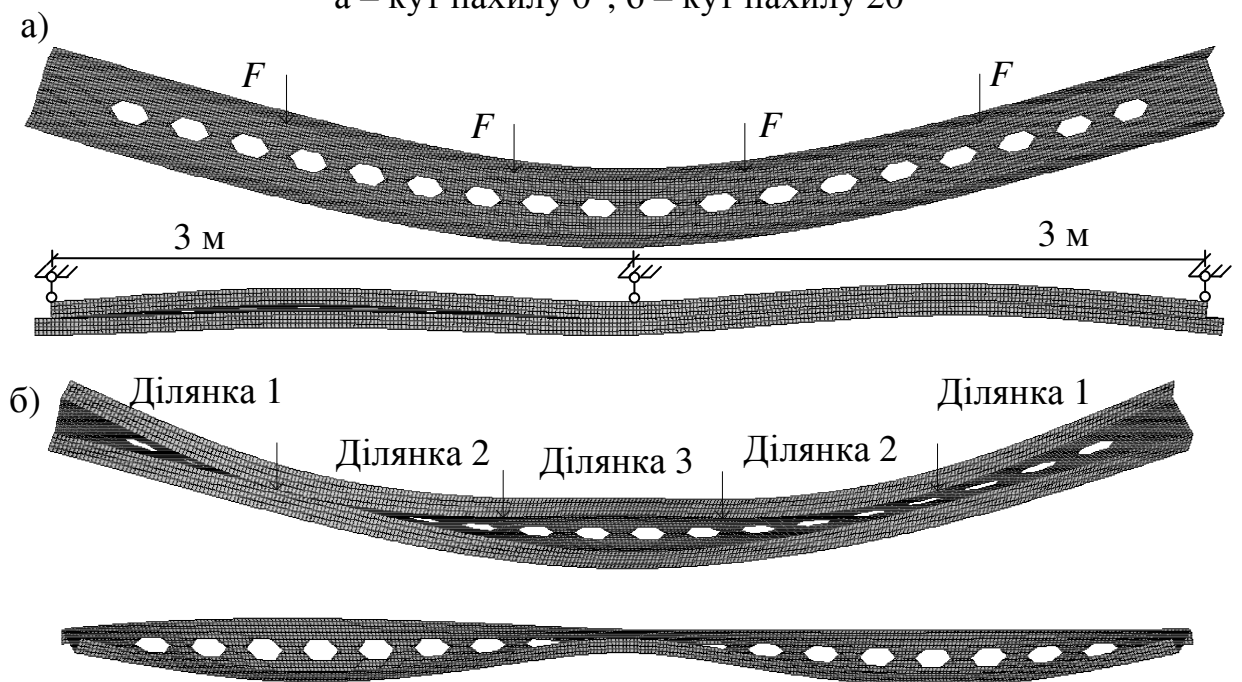


Рисунок 4.23 – Схема деформування перфорованого прогону із площини конструкції, якщо крок закріплення 3 м

а – кут нахилу  $0^\circ$ ; б – кут нахилу  $20^\circ$

Таблиця 4.1 – Нормальні напруження в перерізі перфорованого Z-подібного профілю залежно від кроку закріплення в'язей

Кут нахилу	Навантаження, кН	Точка	Нормальні напруження (МПа), якщо крок закріплення конструкції, м														
			0,6			1,2			1,5			2,0			3,0		
			Ділянка			Ділянка			Ділянка			Ділянка			Ділянка		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0	8,8	1,4	54	100	110	54	100	110	56	103	105	61	96	112	67	102	84
		2,3	62	61	43	63	60	45	64	62	42	66	60	46	72	61	35
		5,6	56	101	111	55	101	111	57	103	103	61	93	113	67	105	79
5	5,6	1,4	37	69	76	37	69	76	38	70	74	40	68	77	41	70	68
		2,3	44	42	30	44	42	27	44	42	31	44	44	31	45	42	32
		5,6	38	70	77	39	70	77	39	71	75	40	68	77	42	71	67
10	3,3	1,4	22	42	46	23	42	46	23	42	47	23	42	46	22	42	48
		2,3	27	26	18	26	26	18	26	25	20	25	27	17	24	25	25
		5,6	23	43	47	23	43	47	23	42	48	23	43	46	22	42	50
15	2,3	1,4	15	29	32	16	29	32	15	28	33	15	30	32	13	29	38
		2,3	20	18	13	18	18	13	18	17	20	16	20	12	14	17	21
		5,6	16	30	33	16	30	33	16	29	35	16	32	32	13	29	41
20	1,8	1,4	12	22	25	12	22	25	11	21	26	10	24	24	8	22	33
		2,3	14	14	10	14	14	10	13	13	11	11	16	9	9	13	18
		5,6	12	23	25	12	23	25	12	22	28	11	25	24	8	22	37
25	1,5	1,4	9	18	20	9	18	20	9	17	22	7	19	19	5	17	30
		2,3	12	11	8	11	11	8	11	10	9	8	13	7	6	10	17
		5,6	9	18	20	10	18	20	9	18	24	8	21	19	5	17	34

Проаналізувавши дані табл. 4.1 і рис. 4.21...4.23 можна зробити висновок, що значення нормальних напружень у характерних перерізах перфорованого прогону для кроків кріплення поперечних в'язей від 0,6 до 1,2 м є однаковими, що свідчить про відсутність поперечних переміщень і крутних моментів у поясах конструкції (див. рис. А.2, дод. А і 4.21). Для кроку закріплення 1,5 м має місце незначне збільшення нормальних напружень у перерізі прогону і початок виникнення поперечних деформацій конструкції (див. рис. А.3, дод. А). Для кроків закріплення 2 і 3 м у верхньому поясі поперечного перерізу виникають значні крутні моменти, які призводять до втрати загальної стійкості конструкції. Це зумовлено відстанню між точками кріплення в'язей, яка є значно більшою від допустимої, визначеної за формулою (4.26).

Для визначення теоретичних прогинів, які виникають у перфорованому Z-подібному профілі за дії зовнішніх навантажень, використовувалась формула методу початкових параметрів, який є універсальним і найбільш розповсюдженим для обчислення прогинів і деформацій будівельних конструкцій

$$\begin{cases} EJ\theta_{xi} = EJ\theta_0 + \sum M_{xi}(x_i - a) + \sum F_{xi} \frac{(x_i - b)^2}{2} + \sum q_{xi} \frac{(x_i - c)^3}{6}; \\ EJv_{xi} = EJv_0 + EJ\theta_0 x_i + \sum M_{xi} \frac{(x_i - a)^2}{2} + \sum F_{xi} \frac{(x_i - b)^3}{6} + \sum q_{xi} \frac{(x_i - c)^4}{24}. \end{cases} \quad (4.27)$$

де  $\theta_{xi}$ ;  $v_{xi}$  – кут повороту та прогин в перерізі, що розглядаються;  $\theta_0$ ;  $v_0$  – кут повороту та прогин елемента на початку системи (початкові параметри);  $M_{xi}$ ;  $F_{xi}$ ;  $q_{xi}$  – відповідно зосереджені моменти, зосереджені сили та величина рівномірно розподіленого навантаження, які діють на конструкцію;  $x_i$  – відстань від початку системи до перерізу, в якому обчислюється деформація;  $a$ ;  $b$ ;  $c$  – відстань від початку системи до точок прикладання відповідно зосереджених моментів, зосереджених сил та до

початку ділянок прикладання розподіленого навантаження;  $J$  – момент інерції перерізу (для перфорованих елементів це момент інерції у послабленому отвором перерізі, що домножується на коефіцієнт 0,95, який враховує деяке збільшення прогину за рахунок податливості перемичок);  $E$  – модуль пружності сталі.

Суть методу полягає у визначенні прогинів у будь-якому перерізі конструкції послідовно, враховуючи всі силові фактори, які мають вплив на цей переріз та параметри його жорсткості, встановивши при цьому деякі початкові загальновідомі передумови (наприклад, що опорні вузли можуть повертатися, але не можуть переміщатися у вертикальній і горизонтальній площинах, тощо).

Крім названих передумов також враховується пружна робота матеріалу та реальні умови проектування відповідно до норм і державних стандартів, що досягається використанням сортаментів і формул [113, 115].

Для досягнення найкращої збіжності результатів проводилося порівняння теоретичних розрахунків з даними, отриманими у ПК „Ліра” і під час натурного експериментального дослідження (табл. 4.2). Для наочності результати порівняння представлено у вигляді графіків на рис. 4.24.

Оскільки головні осі інерції Z-подібного профілю повернуті на деякий кут відносно вертикалі, то такий профіль раціонально використовувати у покриттях зі значним ухилом. Наприклад, для перфорованого прогону, виготовленого з прокатного швелера № 22У/ДСТУ 3436-96, до якого прикладене зовнішнє навантаження  $F = 16,8$  кН, визначене за граничними станами II групи, однакове для кутів нахилу  $0^\circ \dots 25^\circ$ , найменший прогин у конструкції виникатиме для кута  $15^\circ$ , оскільки силова площина майже проходить через головну вісь інерції у і переріз матиме найбільший момент інерції. Графік залежності прогину перфорованого профілю від кута нахилу конструкції зображено на рис. 4.25.

Таблиця 4.2 – Прогини перфорованого прогону без закріплення в площині схилу

Кут нахилу	Навантаження, кН	Прогин, мм		
		МПП	Ліра	Експеримент
0	8,8	16,0	16	16,2
5	5,6	11,7	11,1	10,9
10	3,3	7,4	6,8	5,2
15	2,3	5,2	4,8	4,5
20	1,8	4,1	4,2	4,1
25	1,5	3,3	3,1	2,8

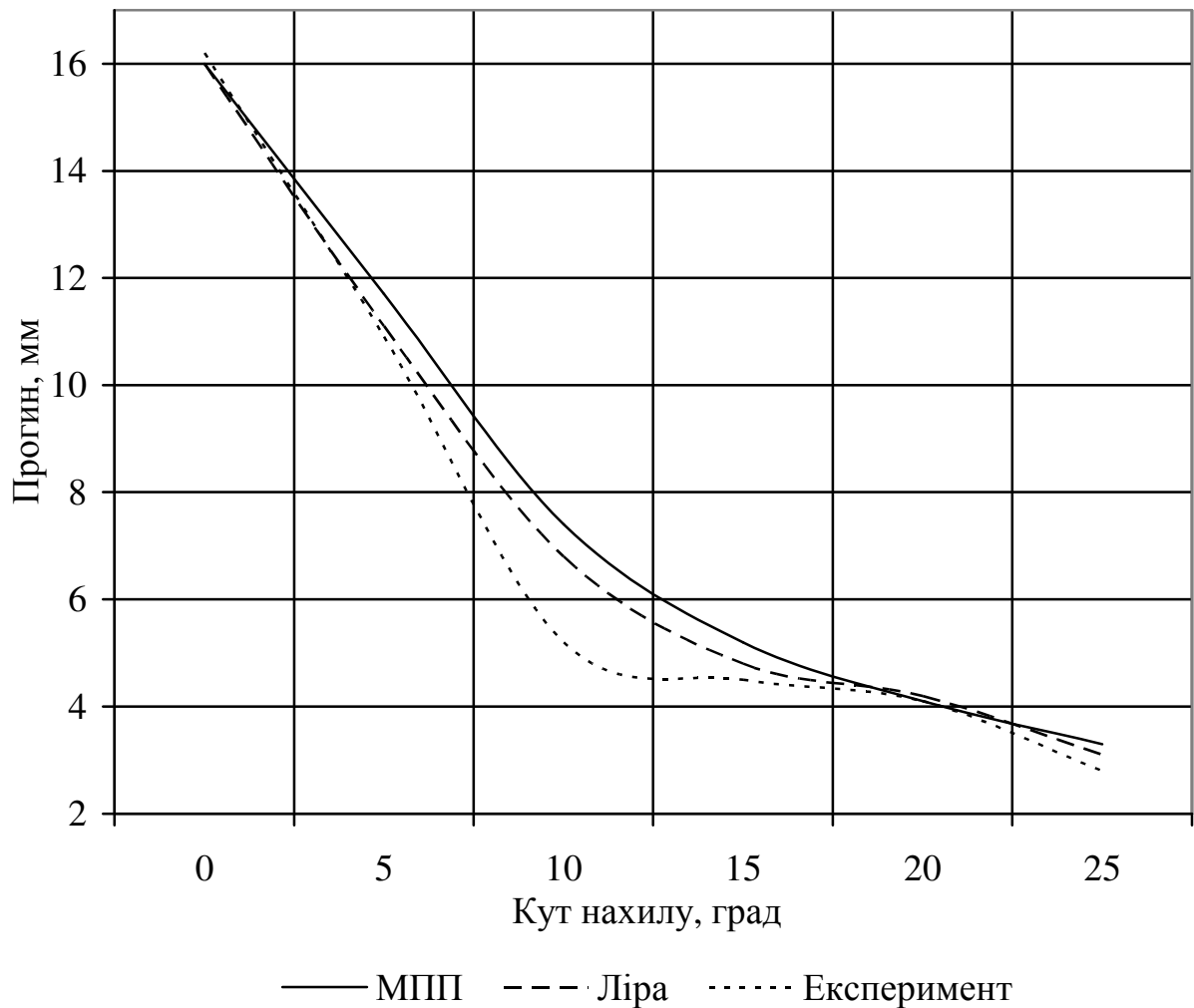


Рисунок 4.24 – Прогини перфорованого прогону, отримані за різними методами розрахунків



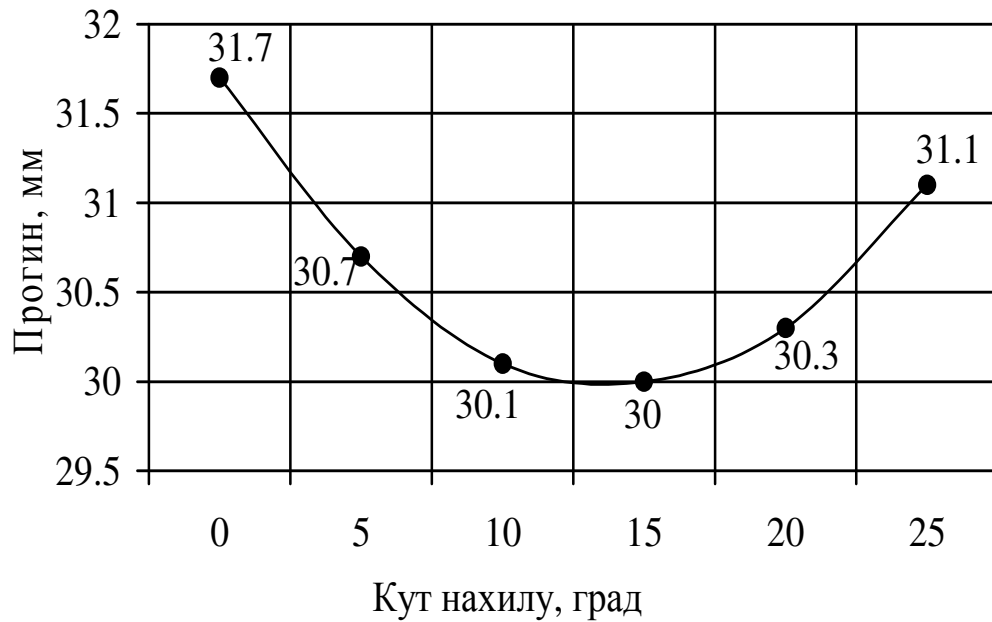


Рисунок 4.25 – Прогини перфорованого прогону залежно від кута нахилу конструкції за дії постійного зовнішнього навантаження  $F = 16,8 \text{ кН}$

#### 4.4. Алгоритм розрахунку перфорованого Z – подібного прогону

У розробленій методиці розрахунку перфорованого Z-подібного прогону для визначення розрахункових зусиль в характерних точках перерізу пропонується використовувати теорію згину, а для визначення деформацій конструкції – метод початкових параметрів.

Задачами розрахунку для будь-якої конструктивної схеми за дії зовнішнього навантаження і типу перерізу прогону є:

1) обчислення розрахункових зусиль в характерних перерізах конструкції;

2) підбір вихідного прокатного профілю найменшої погонної металомісткості з урахуванням коефіцієнта збільшення висоти вихідного профілю  $k = 1,2 \dots 1,5$ ;

3) визначення параметрів розрізу вихідного профілю згідно з рекомендаціями [91, 92];

4) перевірка виконання умов міцності, жорсткості та загальної стійкості.

Розрахункові зусилля  $M$  і  $Q$  визначаються за відомими формулами опору матеріалів, після чого номер вихідного профілю приймається за необхідним моментом опору

$$W_{nec} \approx \frac{M}{kR_y\gamma_c}, \quad (4.28)$$

де  $M$  – згинаючий момент в перерізі прогону,  $k$  – коефіцієнт розвитку вихідного профілю,  $R_y$  – розрахунковий опір сталі за межею текучості,  $\gamma_c$  – коефіцієнт умов роботи.

Номер вихідного профілю і коефіцієнт збільшення висоти перерізу  $k$  приймається залежно від необхідної висоти перфорованого прогону з табл. А.5 і А.6, дод. А шляхом інтерполяції.

Після вибору необхідного значення коефіцієнта розвитку  $k$  визначають геометричні характеристики і розміри перфорованого перерізу, який послаблений отвором (рис. 4.26):

$$H = kh; \quad (4.29) \quad d = 2(H - h); \quad (4.30) \quad h_1 = \frac{(H - d)}{2}; \quad (4.31)$$

$$A_I = (h_I - t_f)t_w + b_f t_f; \quad (4.32) \quad y_c = \frac{(h_I - t_f)^2 \frac{t_w}{2} + \left(h_I - \frac{t_f}{2}\right) b_f t_f}{(h_I - t_f)t_w + b_f t_f}; \quad (4.33)$$

$$z_c = \frac{(h_1 - t_f) \frac{t_w^2}{2} + t_f \frac{b_f^2}{2}}{(h_1 - t_f)t_w + b_f t_f}; \quad (4.34) \quad \arctg \alpha = \frac{z_c}{y_c + \frac{d}{2}}; \quad (4.35) \quad z_1 = h_1 - y_c; \quad (4.36)$$

$$J_I = \frac{b_f t_f^3}{12} + b_f t_f \left(z_1 - \frac{t_f}{2}\right)^2 + \frac{t_w (h_I - t_f)^3}{12} + (h_I - t_f) t_w \left(y_c - \frac{(h_I - t_f)}{2}\right)^2; \quad (4.37)$$

$$J_y = 2 \left( J_I + A_I \left( y_c + \frac{d}{2} \right)^2 \right); \quad (4.38) \quad W_{sup,max} = \frac{J_I}{z_1}; \quad (4.39) \quad W_{sup,min} = \frac{J_I}{y_c}; \quad (4.40)$$

$$i_y = \sqrt{\frac{J_y}{A_1}}, \quad (4.41)$$

де  $h$ ;  $t_f$ ;  $b_f$ ;  $t_w$  – геометричні розміри вихідного швелера із сортаменту.

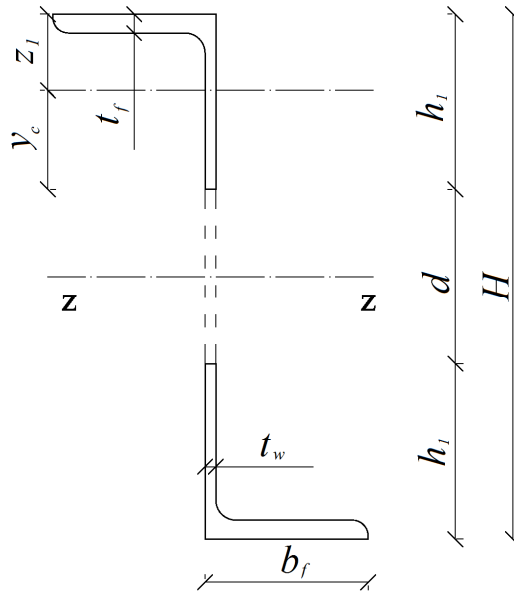


Рисунок 4.26 – Переріз перфорованого прогону, послаблений отвором

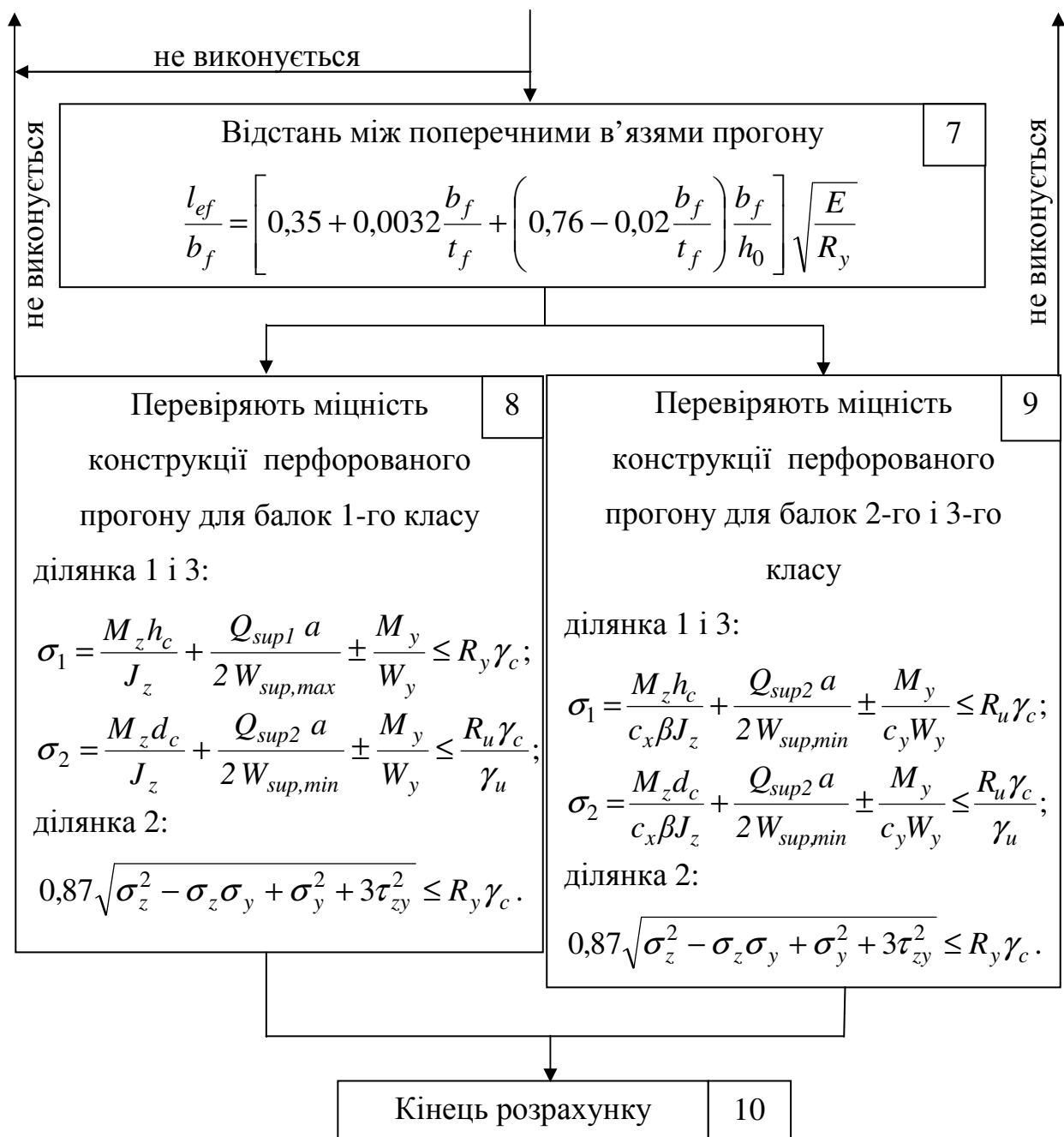
За формулами (4.10)...(4.20) визначають нормальні напруження в характерних перерізах перфорованого Z-подібного прогону. Якщо умова міцності не виконується, то приймають або більший коефіцієнт розвитку вихідного профілю, або, якщо це неможливо, приймають більший номер вихідного швелера і розрахунок повторюється.

За виразом загальної стійкості (4.26) визначається максимально допустима відстань між точками закріплення поперечних в'язей, а за формулою (4.27) – перевіряється прогин конструкції перфорованого прогону, тобто перевіряється придатність конструкції до експлуатації за граничними станами другої групи.

Наведений розрахунок дозволяє виконати проектування перерізів перфорованих прогонів мінімальної металомісткості, що задовольняють умовам міцності і жорсткості.

### Блок схема розрахунку перфорованого Z-подібного прогону





#### 4.5. Висновки до розділу 4

1) Встановлено положення головних центральних осей перерізу, нейтральної осі та площини дії повного згинаючого моменту залежно від початкового нахилу перфорованого Z-подібного профілю та запропоновано формули для визначення відповідних кутів.

2) Встановлено, що небезпечним може бути переріз елемента, у якому не тільки повний згинаючий момент  $M$ , а і жодний зі складових цього моменту  $M_y$  і  $M_z$  не є найбільшими. Тому перевірку необхідно виконувати для декількох поперечних перерізів на різних ділянках по довжині прогону, де виникають найбільші моменти  $M_y$  або  $M_z$  і в яких вони одночасно мають достатньо великі значення.

3) Запропоновано формули для визначення напружень в характерних точках перфорованих елементів з отворами і без них в умовах косого згину для розрахунку з урахуванням та без урахування пружно-пластичних деформацій.

4) Побудовано графіки залежностей несучої здатності перфорованих прогонів для різних вихідних профілів і для різних коефіцієнтів розвитку висоти їх перерізу відповідно з урахуванням та без урахування поперечних деформацій.

5) Визначено деформації конструкції перфорованого Z-подібного профілю та положення лінії деформування відносно головних центральних осей перерізу, нейтральної осі та площини дії повного згинаючого моменту, залежно від відстані між точками закріплення прогону з його площини.

6) Розроблено алгоритм та методику розрахунку перфорованого Z-подібного прогону за граничними станами I і II груп для балок 1, 2 та 3-го класів симетричного та несиметричного перерізів для моно- та бісталевих елементів з урахуванням закріплень із площини.

7) Матеріали розділу відображено в роботі [94].

## Розділ 5

### Числові дослідження перфорованого прогону Z – подібного профілю прольотом 6 м

Числові дослідження проводились з метою перевірки можливості використання запропонованої методики розрахунку перфорованих елементів в умовах косого згину і представляють собою приклад практичного її використання. Даний розрахунок виконано відповідно до розробленого алгоритму, який наведено у розділі 4.

Виконано порівняльний розрахунок суцільного профілю та перфорованого прогону.

#### 5.1. Вихідні дані

Підібрати переріз прогону покриття за такими даними: балка однопролітна на двох опорах; розрахункове граничне навантаження  $g = 1,69 \text{ кН} / \text{м}^2$ , яке складається зі снігового навантаження, власної ваги панелі типу „сендвич” та власної ваги прогону; клас відповідальності споруди – СС1, категорія В; проліт прогону  $l = 6 \text{ м}$ ; крок розташування прогонів покриття  $a = 6 \text{ м}$ ; відносний граничний прогин  $f_u / l = 1/200$ ; клас сталі прогону – С 275; ухил покрівлі  $\alpha = 15^\circ$ .

#### 5.2. Визначення розрахункових зусиль в конструкції

Величини згинаючого моменту та поперечної сили, які виникають в прогоні від прикладеного навантаження складають (рис. 5.1):

$$M = \frac{ql^2}{8} = \frac{10,14 \cdot 10^3 \cdot 6^2}{8} = 45,6 \text{ кНм}; \quad (5.1)$$

$$Q = \frac{ql}{2} = \frac{10,14 \cdot 10^3 \cdot 6}{2} = 30,4 \text{ кН}, \quad (5.2)$$

де  $q = ga = 1,69 \cdot 6 = 10,14 \text{ кН/м}$ .

Згідно з табл. Е.2 додатку Е [113] для класу сталі С 275 розрахункові опори становлять  $R_y = 270 \text{ МПа}$  і  $R_u = 380 \text{ МПа}$ , які прийняті для товщини прокату до 20 мм.

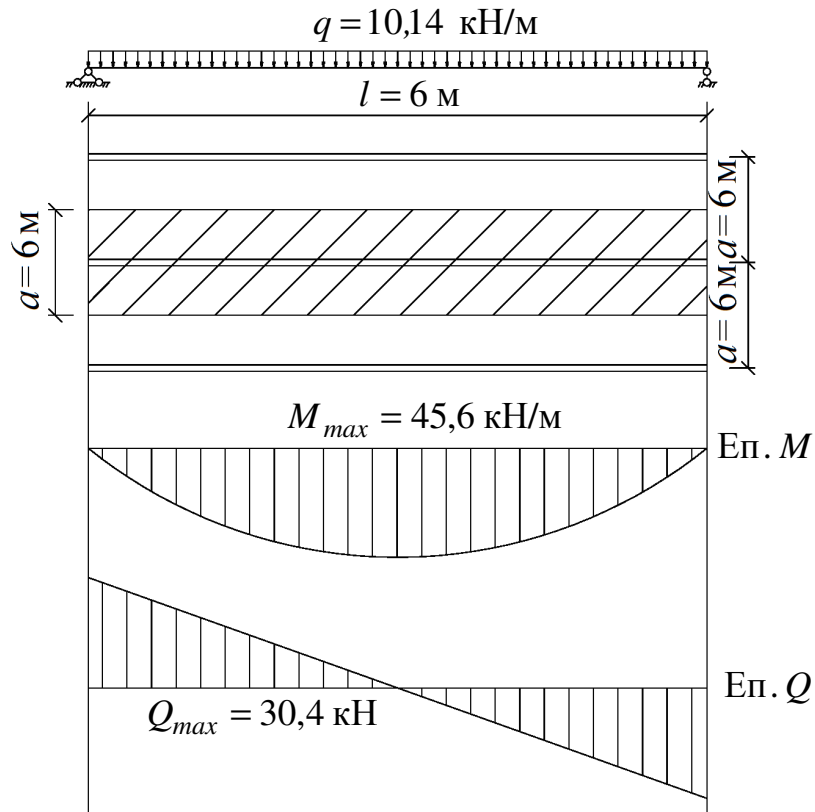


Рисунок 5.1 – Розрахункова схема прогону

### 5.3. Підбір перерізу прогону покриття

#### 5.3.1. Суцільний профіль

##### 5.3.1.1. Підбір перерізу балок 1-го класу

Порядок розрахунку



1) Необхідний момент опору швелера для суцільного прогону з урахуванням кута нахилу покрівлі

$$W_{nec} = \frac{M \cos 15^\circ}{R_y \gamma_c} = \frac{45,6 \cdot 10^3 \cdot 0,9659}{270 \cdot 10^6 \cdot 0,9} = 181 \text{ см}^3, \quad (5.3)$$

де  $\gamma_c = 0,9$  – для балок суцільного перерізу, якщо тимчасове навантаження не перевищує ваги покриття.

2) За необхідним моментом опору з сортаменту прийнято номер швелера № 22У/ДСТУ 3436-96, для якого  $I_x = 2110 \text{ см}^4$ ;  $W_x = 192 \text{ см}^3$ ;  $S_x = 110 \text{ см}^3$ ;  $h = 22 \text{ см}$ ;  $t_f = 0,95 \text{ см}$ ;  $t_w = 0,54 \text{ см}$ ;  $b_f = 8,2 \text{ см}$ .

3) Жорсткість балки

$$\frac{f}{l} = \frac{5}{384} \frac{q_e \cos 15^\circ l^3}{EI_x} = \frac{5 \cdot 10,14 \cdot 10^3 \cdot 6^3 \cdot 0,9659}{384 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 2110 \cdot 10^{-8}} = \frac{1}{158} > \frac{f_u}{l} = \frac{1}{200}, \quad (5.4)$$

де  $q_e = ga = 1,69 \cdot 6 = 10,14 \text{ кН / м}$ .

Оскільки умова не виконується, то необхідно прийняти із сортаменту більший профіль.

4) Прийнято номер швелера № 24У/ДСТУ 3436-96, для якого  $I_x = 2900 \text{ см}^4$ ;  $W_x = 242 \text{ см}^3$ ;  $S_x = 139 \text{ см}^3$ ;  $h = 24 \text{ см}$ ;  $t_f = 1 \text{ см}$ ;  $t_w = 0,56 \text{ см}$ ;  $b_f = 9 \text{ см}$ .

5) Жорсткість балки

$$\frac{f}{l} = \frac{5}{384} \frac{q_e \cos 15^\circ l^3}{EI_x} = \frac{5 \cdot 10,14 \cdot 10^3 \cdot 6^3 \cdot 0,9659}{384 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 2900 \cdot 10^{-8}} = \frac{1}{217} < \frac{f_u}{l} = \frac{1}{200}. \quad (5.5)$$

6) Перевірки міцності

а) за нормальними напруженнями

$$\sigma = \frac{M \cos 15^\circ}{W_x} = \frac{45,6 \cdot 10^3 \cdot 0,9659}{242 \cdot 10^{-6}} = 182 \text{ МПа} < R_y \gamma_c = 270 \cdot 0,9 = 243 \text{ МПа}; \quad (5.6)$$

б) за дотичними напруженнями

$$\tau = \frac{Q \cos 15^\circ S_x}{I_x t_w} = \frac{30,4 \cdot 10^3 \cdot 139 \cdot 10^{-6} \cdot 0,9659}{2900 \cdot 10^{-8} \cdot 0,56 \cdot 10^{-2}} = 25,1 \text{ МПа} < R_s \gamma_c = 0,58 R_y \gamma_c =$$

$$= 0,58 \cdot 270 \cdot 0,9 = 140,9 \text{ МПа} . \quad (5.7)$$

Недонапруження становить

$$\frac{R_y \gamma_c - \sigma}{R_y \gamma_c} = \frac{270 \cdot 0,9 - 182}{270 \cdot 0,9} = 25\% > 5\% . \quad (5.8)$$

Недонапруження перевищує 5%, але використання меншого профілю, тобто №22У/ДСТУ 3436-96, неможливе, оскільки у цьому випадку  $\sigma > R_y \gamma_c$ .

Перевірки місцевої стійкості поясів і стінки прогону не виконуються, оскільки вони забезпечуються прийнятими товщинами елементів під час прокатування профілів.

Маса прогону довжиною  $l = 6 \text{ м}$  становить  $m = m_l l = 24 \cdot 6 = 144 \text{ кг}$ , де  $m_l = 24 \text{ кг}$  – маса 1 п. м. № 24У/ДСТУ 3436-96.

### 5.3.1.2. Підбір перерізу балок 2-го і 3-го класів

Порядок розрахунку

1) На першому етапі розрахунку прийнято значення коефіцієнтів  $c_x = 1,1$  і  $\beta = 1$  та визначено необхідний момент опору вихідного профілю

$$W_{nec} = \frac{M \cos 15^\circ}{c_x \beta R_y \gamma_c / \gamma_n} = \frac{45,6 \cdot 10^3 \cdot 0,9659}{1,1 \cdot 1 \cdot 270 \cdot 10^6 \cdot 0,9 / 0,95} = 157 \text{ см}^3 . \quad (5.9)$$

2) За необхідним моментом опору з сортаменту прийнято номер швелера № 22У/ДСТУ 3436-96.

3) Жорсткість балки

$$\frac{f}{l} = \frac{5}{384} \frac{q_e \cos 15^\circ l^3}{EI_x} = \frac{5 \cdot 10,14 \cdot 10^3 \cdot 6^3 \cdot 0,9659}{384 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 2110 \cdot 10^{-8}} = \frac{1}{158} > \frac{f_u}{l} = \frac{1}{200} . \quad (5.10)$$

Оскільки умова не виконується, то необхідно прийняти із сортаменту більший профіль.

4) Прийнято номер швелера № 24У/ДСТУ 3436-96.

5) Жорсткість балки

$$\frac{f}{l} = \frac{5}{384} \frac{q_e \cos 15^\circ l^3}{EI_x} = \frac{5 \cdot 10,14 \cdot 10^3 \cdot 6^3 \cdot 0,9659}{384 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 2900 \cdot 10^{-8}} = \frac{1}{217} < \frac{f_u}{l} = \frac{1}{200}. \quad (5.11)$$

6) Дотичні напруження

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{Q \cos 15^\circ}{t_w h_w} = \frac{30,4 \cdot 10^3 \cdot 0,9659}{0,56 \cdot 10^{-2} \cdot 22 \cdot 10^{-2}} = 23,8 \text{ МПа} < R_s \gamma_c / \gamma_n = 0,58 R_y \gamma_c / \gamma_n = \\ &= 0,58 \cdot 270 \cdot 0,9 / 0,95 = 148,4 \text{ МПа}, \end{aligned} \quad (5.12)$$

де  $h_w = h - 2t_f = 24 - 2 \cdot 1 = 22 \text{ см}$ .

Оскільки  $\tau = 23,8 \text{ МПа} < 0,5 R_s = 0,5 \cdot 148,4 = 74,2 \text{ МПа}$ , то  $\beta = 1$ .

7) Співвідношення

$$\alpha = \frac{A_f}{A_w} = \frac{9}{12,3} = 0,73, \quad (5.13)$$

де  $A_f = b_f t_f = 9 \cdot 1 = 9 \text{ см}^2$ ;  $A_w = t_w h_w = 0,56 \cdot 22 = 12,3 \text{ см}^2$ .

8) З табл. Н.1 додатку Н [113] для типу перерізу 1 для співвідношення  $A_f / A_w = 0,73$  шляхом інтерполяції визначено точне значення коефіцієнта  $c_x$ , яке становить  $c_x = 1,097$ .

9) Перевірки міцності:

а) за нормальними напруженнями

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{M \cos 15^\circ}{c_x \beta W_x} = \frac{45,6 \cdot 10^3 \cdot 0,9659}{1,097 \cdot 1 \cdot 242 \cdot 10^{-6}} = 166 \text{ МПа} < R_y \gamma_c / \gamma_n = \\ &= 270 \cdot 0,9 / 0,95 = 256 \text{ МПа}; \end{aligned} \quad (5.14)$$

б) за дотичними напруженнями

$$\tau = \frac{Q \cos 15^\circ S_x}{I_x t_w} = \frac{30,4 \cdot 10^3 \cdot 139 \cdot 10^{-6} \cdot 0,9659}{2900 \cdot 10^{-8} \cdot 0,56 \cdot 10^{-2}} = 25,1 \text{ МПа} < R_s \gamma_c / \gamma_n =$$

$$= 0,58R_y\gamma_c = 0,58 \cdot 270 \cdot 0,9 / 0,95 = 148,4 \text{ МПа} . \quad (5.15)$$

Недонапруження становить

$$\frac{R_y\gamma_c - \sigma}{R_y\gamma_c} = \frac{270 \cdot 0,9 - 166}{270 \cdot 0,9} = 32\% > 5\% . \quad (5.16)$$

Недонапруження перевищує 5%, але використання меншого раніше прийнятого профілю, тобто № 22У/ДСТУ 3436-96, неможливе, оскільки у цьому випадку  $\frac{f}{l} > \frac{f_u}{l}$ .

Перевірки місцевої стійкості поясів і стінки прогону не виконуються, оскільки вони забезпечуються прийнятими товщинами елементів під час прокатування профілів.

Маса прогону довжиною  $l = 6 \text{ м}$  становить  $m = m_l l = 24 \cdot 6 = 144 \text{ кг}$ , де  $m_l = 24 \text{ кг}$  – маса 1 п. м. № 24У/ДСТУ 3436-96.

### 5.3.2. Перфорований профіль

#### 5.3.2.1. Підбір перерізу балок 1-го класу

Порядок розрахунку

1) Необхідний момент опору вихідного швелера для перфорованого прогону з урахуванням кута нахилу покрівлі становить

$$W_{nec} = \frac{M \cos 15^\circ}{k R_y \gamma_c} = \frac{45,6 \cdot 10^3 \cdot 0,9659}{1,3 \cdot 270 \cdot 10^6 \cdot 0,9} = 139 \text{ см}^3, \quad (5.17)$$

де  $k = 1,3$  – попередньо прийняте значення коефіцієнта розвитку висоти перерізу відповідно до даних табл. А.5 і А.6 дод. А.

2) За необхідним моментом опору з сортаменту прийнято номер швелера № 20У/ДСТУ 3436-96, для якого  $I_x = 1520 \text{ см}^4$ ;  $W_x = 152 \text{ см}^3$ ;  $S_x = 87,8 \text{ см}^3$ ;  $h = 20 \text{ см}$ ;  $t_f = 0,9 \text{ см}$ ;  $t_w = 0,52 \text{ см}$ ;  $b_f = 7,6 \text{ см}$ .

3) Геометричні характеристики перфорованого профілю відповідно до розробленого алгоритму розрахунку:

а) переріз послаблений отвором (переріз 2-2):

$$H = kh = 1,3 \cdot 20 = 26 \text{ см}; \quad (5.18)$$

$$d = 2(H - h) = 2(26 - 20) = 12 \text{ см}; \quad (5.19)$$

$$h_1 = \frac{H - d}{2} = \frac{26 - 12}{2} = 7 \text{ см}; \quad (5.20)$$

$$A_1 = (h_1 - t_f)t_w + b_ft_f = (7 - 0,9) \cdot 0,52 + 7,6 \cdot 0,9 = 10 \text{ см}^2; \quad (5.21)$$

$$y_c = \frac{(h_1 - t_f)^2 \frac{t_w}{2} + \left(h_1 - \frac{t_f}{2}\right) b_ft_f}{(h_1 - t_f)t_w + b_ft_f} = \frac{(7 - 0,9)^2 \cdot \frac{0,52}{2} + \left(7 - \frac{0,9}{2}\right) \cdot 7,6 \cdot 0,9}{(7 - 0,9) \cdot 0,52 + 7,6 \cdot 0,9} = 5,4 \text{ см}; \quad (5.22)$$

$$z_c = \frac{(h_1 - t_f) \frac{t_w^2}{2} + t_f \frac{b_f^2}{2}}{(h_1 - t_f)t_w + b_ft_f} = \frac{(7 - 0,9) \cdot \frac{0,52^2}{2} + 0,9 \cdot \frac{7,6^2}{2}}{(7 - 0,9) \cdot 0,52 + 7,6 \cdot 0,9} = 2,7 \text{ см}; \quad (5.23)$$

$$\gamma = \arctg\left(\frac{z_c}{y_c + \frac{d}{2}}\right) = \arctg\left(\frac{2,7}{5,4 + \frac{12}{2}}\right) = 13^\circ; \quad (5.24)$$

$$z_1 = h_1 - y_c = 7 - 5,4 = 1,6 \text{ см}; \quad (5.25)$$

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{b_ft_f^3}{12} + b_ft_f \left(z_1 - \frac{t_f}{2}\right)^2 + \frac{t_w(h_1 - t_f)^3}{12} + (h_1 - t_f)t_w \left(y_c - \frac{(h_1 - t_f)}{2}\right)^2 = \\ &= \frac{7,6 \cdot 0,9^3}{12} + 7,6 \cdot 0,9 \cdot \left(1,6 - \frac{0,9}{2}\right)^2 + \frac{0,52 \cdot (7 - 0,9)^3}{12} + (7 - 0,9) \cdot 0,52 \times \\ &\quad \times \left(5,4 - \frac{7 - 0,9}{2}\right)^2 = 36,8 \text{ см}^4; \end{aligned} \quad (5.26)$$

$$I_{x,o} = 2 \left( I_I + A_I \left( y_c + \frac{d}{2} \right)^2 \right) = 2 \cdot \left( 36,8 + 10 \cdot \left( 5,4 + \frac{12}{2} \right)^2 \right) = 2695 \text{ см}^4; \quad (5.27)$$

$$W_{sup,min} = \frac{I_I}{y_c} = \frac{36,8}{5,4} = 6,7 \text{ см} \quad \text{і} \quad W_{sup,max} = \frac{I_I}{z_I} = \frac{36,8}{1,6} = 23,6 \text{ см}; \quad (5.28)$$

$$S_{x,o} = HA_I = 26 \cdot 10 = 260 \text{ см}^3. \quad (5.29)$$

б) переріз без отвору (переріз 1-1):

$$H = kh = 1,3 \cdot 20 = 26 \text{ см}; \quad (5.30)$$

$$A = (H - 2t_f) t_w + 2b_f t_f = (26 - 2 \cdot 0,9) \cdot 0,52 + 2 \cdot 7,6 \cdot 0,9 = 26,3 \text{ см}^2; \quad (5.31)$$

$$y_c = \frac{H}{2} = \frac{26}{2} = 13 \text{ см} \quad \text{і} \quad z_c = b_f - \frac{t_w}{2} = 7,6 - \frac{0,52}{2} = 7,3 \text{ см}; \quad (5.32)$$

$$I_{x,m} = 2 \left( \frac{b_f t_f^3}{12} + b_f t_f \left( \frac{H - t_f}{2} \right)^2 \right) + \frac{t_w (H - 2t_f)^3}{12} =$$

$$= 2 \cdot \left( \frac{7,6 \cdot 0,9^3}{12} + 7,6 \cdot 0,9 \cdot \left( \frac{26 - 0,9}{2} \right)^2 \right) + \frac{0,52 \cdot (26 - 2 \cdot 0,9)^3}{12} = 2770 \text{ см}^4; \quad (5.33)$$

$$S_{x,m} = \frac{HA}{2} = \frac{26 \cdot 26,3}{2} = 342 \text{ см}^3. \quad (5.34)$$

4) Жорсткість балки

$$\frac{f}{l} = \frac{5}{384} \frac{q_e \cos(15^\circ - 13^\circ) l^3}{EI_x} = \frac{5 \cdot 10,14 \cdot 10^3 \cdot 6^3 \cdot 0,9994}{384 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 2695 \cdot 10^{-8}} = \frac{1}{195} > \frac{f_u}{l} = \frac{1}{200}. \quad (5.35)$$

Оскільки умова не виконується, то необхідно прийняти із сортаменту більший профіль.

5) Прийнято номер швелера № 22У/ДСТУ 3436-96.

6) Геометричні характеристики перфорованого профілю відповідно до розробленого алгоритму розрахунку (рис. 5.2):

а) переріз послаблений отвором (переріз 2-2):

$$H = kh = 1,3 \cdot 22 = 28,6 \text{ см}; \quad (5.36)$$

$$d = 2(H - h) = 2(28,6 - 22) = 13,2 \text{ см}; \quad (5.37)$$

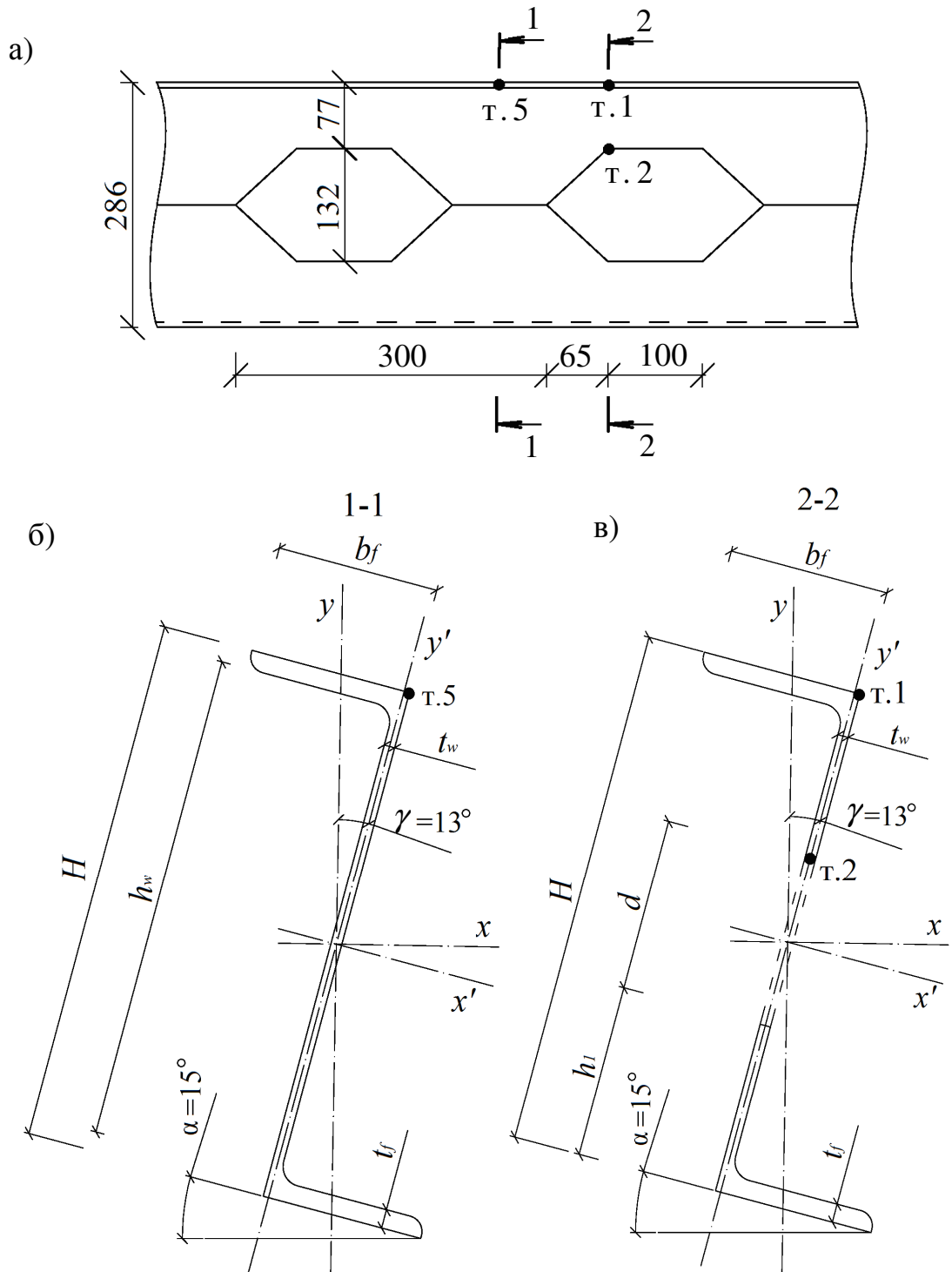


Рисунок 5.2 –Перфорований елемент

а – загальний вигляд; б – переріз 1-1; в – переріз 2-2;  $x - x$ ;  $y - y$  і  $x' - x'$ ;  $y' - y'$  – відповідно головні осі інерції і центральні осі перерізу

$$h_1 = \frac{H-d}{2} = \frac{28,6-13,2}{2} = 7,7 \text{ см}; \quad (5.38)$$

$$A_1 = (h_1 - t_f) t_w + b_f t_f = (7,7 - 0,95) \cdot 0,54 + 8,2 \cdot 0,95 = 11,4 \text{ см}^2; \quad (5.39)$$

$$y_c = \frac{(h_1 - t_f)^2 \frac{t_w}{2} + \left(h_1 - \frac{t_f}{2}\right) b_f t_f}{(h_1 - t_f) t_w + b_f t_f} = \frac{(7,7 - 0,95)^2 \cdot \frac{0,54}{2} + \left(7,7 - \frac{0,95}{2}\right) \cdot 8,2 \cdot 0,95}{(7,7 - 0,95) \cdot 0,54 + 8,2 \cdot 0,95} = 6 \text{ см}; \quad (5.40)$$

$$z_c = \frac{(h_1 - t_f) \frac{t_w^2}{2} + t_f \frac{b_f^2}{2}}{(h_1 - t_f) t_w + b_f t_f} = \frac{(7,7 - 0,95) \cdot \frac{0,54^2}{2} + 0,95 \cdot \frac{8,2^2}{2}}{(7,7 - 0,95) \cdot 0,54 + 8,2 \cdot 0,95} = 2,9 \text{ см}; \quad (5.41)$$

$$\gamma = \arctg \left( \frac{z_c}{y_c + \frac{d}{2}} \right) = \arctg \left( \frac{2,9}{6 + \frac{13,2}{2}} \right) = 13^\circ; \quad (5.42)$$

$$z_1 = h_1 - y_c = 7,7 - 6 = 1,7 \text{ см}; \quad (5.43)$$

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{b_f t_f^3}{12} + b_f t_f \left( z_1 - \frac{t_f}{2} \right)^2 + \frac{t_w (h_1 - t_f)^3}{12} + (h_1 - t_f) t_w \left( y_c - \frac{(h_1 - t_f)}{2} \right)^2 = \\ &= \frac{8,2 \cdot 0,95^3}{12} + 8,2 \cdot 0,95 \cdot \left( 1,7 - \frac{0,95}{2} \right)^2 + \frac{0,54 (7,7 - 0,95)^3}{12} + (7,7 - 0,95) \cdot 0,54 \times \\ &\quad \times \left( 6 - \frac{7,7 - 0,95}{2} \right)^2 = 51,2 \text{ см}^4; \end{aligned} \quad (5.44)$$

$$I_{x,o} = 2 \left( I_1 + A_1 \left( y_c + \frac{d}{2} \right)^2 \right) = 2 \cdot \left( 51,2 + 11,4 \cdot \left( 6 + \frac{13,2}{2} \right)^2 \right) = 3732 \text{ см}^4; \quad (5.45)$$

$$W_{sup,min} = \frac{I_1}{y_c} = \frac{51,2}{6} = 8,5 \text{ см} \quad \text{і} \quad W_{sup,max} = \frac{I_1}{z_1} = \frac{51,2}{1,7} = 30,1 \text{ см}; \quad (5.46)$$

$$S_{x,o} = H A_1 = 28,6 \cdot 11,4 = 326 \text{ см}^3. \quad (5.47)$$

б) переріз без отвору (переріз 1-1):

$$H = kh = 1,3 \cdot 22 = 28,6 \text{ см}; \quad (5.48)$$

$$A = (H - 2t_f) t_w + 2b_f t_f = (28,6 - 2 \cdot 0,95) 0,54 + 2 \cdot 8,2 \cdot 0,95 = 30 \text{ см}^2; \quad (5.49)$$



$$y_c = \frac{H}{2} = \frac{28,6}{2} = 14,3 \text{ см} \quad \text{і} \quad z_c = b_f - \frac{t_w}{2} = 8,2 - \frac{0,54}{2} = 7,9 \text{ см}; \quad (5.50)$$

$$I_{x,m} = 2 \left( \frac{b_f t_f^3}{12} + b_f t_f \left( \frac{H - t_f}{2} \right)^2 \right) + \frac{t_w (H - 2t_f)^3}{12} =$$

$$= 2 \cdot \left( \frac{8,2 \cdot 0,95^3}{12} + 8,2 \cdot 0,95 \cdot \left( \frac{28,6 - 0,95}{2} \right)^2 \right) + \frac{0,54(28,6 - 2 \cdot 0,95)^3}{12} = 3835 \text{ см}^4; (5.51)$$

$$S_{x,m} = \frac{HA}{2} = \frac{28,6 \cdot 30}{2} = 429 \text{ см}^3. \quad (5.52)$$

7) Жорсткість балки

$$\frac{f}{l} = \frac{5}{384} \frac{q_e \cos(15^\circ - 13^\circ) l^3}{EI_x} = \frac{5 \cdot 10,14 \cdot 10^3 \cdot 6^3 \cdot 0,9994}{384 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 3732 \cdot 10^{-8}} = \frac{1}{270} < \frac{f_u}{l} = \frac{1}{200}. (5.53)$$

Умова виконується.

8) Відстань між поперечними в'язями для закріплення прогону

$$l_{ef} = b_f \left[ 0,35 + 0,0032 \frac{b_f}{t_f} + \left( 0,76 - 0,02 \frac{b_f}{t_f} \right) \frac{b_f}{h_0} \right] \sqrt{\frac{E}{R_y}} =$$

$$= 8,2 \cdot \left( 0,35 + 0,0032 \cdot 15 + (0,76 - 0,02 \cdot 15) \frac{8,2}{26,7} \right) \sqrt{\frac{2,06 \cdot 10^{11}}{270 \cdot 10^6}} = 122 \text{ см} = 1,2 \text{ м}, (5.54)$$

де  $h_0 = H - 2t_f = 28,6 - 2 \cdot 0,95 = 26,7 \text{ см}$ .

9) Для виконання перевірки міцності спочатку визначено внутрішні зусилля у відповідних перерізах прогону на характерних ділянках (див. рис. 2.7, в):

а) ділянка 1 в перерізі без отвору:

$$M_{0,9} = \left( \frac{0,9^2 q}{2} - \frac{0,9ql}{2} \right) \cos(15^\circ - 13^\circ) = \left( \frac{0,9^2 \cdot 10,14}{2} - \frac{0,9 \cdot 10,14 \cdot 6}{2} \right) \cos 2^\circ =$$

$$= 23,3 \text{ кН} / \text{м}; \quad (5.55)$$

$$Q_{0,9} = \left( \frac{ql}{2} - 0,9q \right) \cos(15^\circ - 13^\circ) = \left( \frac{10,14 \cdot 6}{2} + 0,9 \cdot 10,14 \right) \cos 2^\circ = 21,3 \text{ кН}; (5.56)$$

$$\sigma_5 = \frac{M_{0,9} h_c}{J_{x,m}} + \frac{Q_{0,9} a}{2 W_{sup,max}} \pm \frac{M_y}{W_y} = \frac{23,3 \cdot 10^3 \cdot 14,3 \cdot 10^{-2}}{3835 \cdot 10^{-8}} = 87 \text{ МПа} < R_y \gamma_c = 270 \cdot 0,9 = 243 \text{ МПа}; \quad (5.57)$$

б) ділянка 1 в перерізі послабленому отвором:

$$M_1 = \left( \frac{q}{2} - \frac{ql}{2} \right) \cos(15^\circ - 13^\circ) = \left( \frac{10,14}{2} - \frac{10,14 \cdot 6}{2} \right) \cos 2^\circ = 25,3 \text{ кН / м}; \quad (5.58)$$

$$Q_1 = \left( \frac{ql}{2} - q \right) \cos(15^\circ - 13^\circ) = \left( \frac{10,14 \cdot 6}{2} - 10,14 \right) \cos 2^\circ = 20,2 \text{ кН}; \quad (5.59)$$

$$\sigma_1 = \frac{M_1 h_c}{J_{x,o}} + \frac{Q_1 a}{2 W_{sup,max}} \pm \frac{M_y}{W_y} = \frac{25,3 \cdot 10^3 \cdot 14,3 \cdot 10^{-2}}{3732 \cdot 10^{-8}} + \frac{0,5 \cdot 20,2 \cdot 10^3 \cdot 0,1}{2 \cdot 30,1 \cdot 10^{-6}} = 114 \text{ МПа} < R_y \gamma_c = 270 \cdot 0,9 = 243 \text{ МПа}; \quad (5.60)$$

$$\sigma_2 = \frac{M_1 d_c}{J_{x,o}} + \frac{Q_1 a}{2 W_{sup,min}} \pm \frac{M_y}{W_y} = \frac{25,3 \cdot 10^3 \cdot 6,6 \cdot 10^{-2}}{3732 \cdot 10^{-8}} + \frac{0,5 \cdot 20,2 \cdot 10^3 \cdot 0,1}{2 \cdot 8,5 \cdot 10^{-6}} = 104 \text{ МПа} < \frac{R_u \gamma_c}{\gamma_u} = \frac{380 \cdot 0,9}{1,0} = 342 \text{ МПа}; \quad (5.61)$$

в) ділянка 2 в перерізі без отвору:

$$M_2 = \left( \frac{2ql}{2} - \frac{2^2 q}{2} \right) \cos(15^\circ - 13^\circ) = \left( \frac{2 \cdot 10,14 \cdot 6}{2} - \frac{4 \cdot 10,14}{2} \right) \cos 2^\circ = 40,5 \text{ кН / м}; \quad (5.62)$$

$$Q_2 = \left( \frac{ql}{2} - 2q \right) \cos(15^\circ - 13^\circ) = \left( \frac{10,14 \cdot 6}{2} + 2 \cdot 10,14 \right) \cos 2^\circ = 10,1 \text{ кН / м}; \quad (5.63)$$

$$\sigma_5 = \frac{M_2 h_c}{J_{x,m}} + \frac{Q_2 a}{2 W_{sup,max}} \pm \frac{M_y}{W_y} = \frac{40,5 \cdot 10^3 \cdot 14,3 \cdot 10^{-2}}{3835 \cdot 10^{-8}} = 151 \text{ МПа} < R_y \gamma_c = 270 \cdot 0,9 = 243 \text{ МПа}; \quad (5.64)$$

$$\tau_{xy} = \frac{Q_2 S_{x,m}}{I_{x,m} t_w} = \frac{10,1 \cdot 10^3 \cdot 429 \cdot 10^{-6}}{3835 \cdot 10^{-8} \cdot 0,54 \cdot 10^{-2}} = 20,9 \text{ МПа}; \quad (5.65)$$

$$0,87 \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} = 0,87 \cdot \sqrt{151^2 + 3 \cdot 20,9^2} = 135 \text{ МПа} <$$

$$< R_y \gamma_c = 270 \cdot 0,9 = 243 \text{ МПа}; \quad (5.66)$$

г) ділянка 2 в перерізі послабленому отвором:

$$M_{2,I} = \left( \frac{2,1ql}{2} - \frac{2,1^2 q}{2} \right) \cos(15^\circ - 13^\circ) = \left( \frac{2,1 \cdot 10,14 \cdot 6}{2} - \frac{2,1^2 \cdot 10,14}{2} \right) \cos 2^\circ =$$

$$= 41,4 \text{ кН/м}; \quad (5.67)$$

$$Q_{2,I} = \left( \frac{ql}{2} - 2,1q \right) \cos(15^\circ - 13^\circ) = \left( \frac{10,14 \cdot 6}{2} - 2,1 \cdot 10,14 \right) \cos 2^\circ = 9,11 \text{ кН}; \quad (5.68)$$

$$\sigma_I = \frac{M_{2,I} h_c}{J_{x,o}} + \frac{Q_{2,I} a}{2 W_{sup,max}} \pm \frac{M_y}{W_y} = \frac{41,4 \cdot 10^3 \cdot 14,3 \cdot 10^{-2}}{3732 \cdot 10^{-8}} +$$

$$+ \frac{0,5 \cdot 9,11 \cdot 10^3 \cdot 0,1}{2 \cdot 30,1 \cdot 10^{-6}} = 166 \text{ МПа} < R_y \gamma_c = 270 \cdot 0,9 = 243 \text{ МПа}; \quad (5.69)$$

$$\tau_{xy} = \frac{Q_2 S_{x,o}}{I_{x,o} t_w} = \frac{9,11 \cdot 10^3 \cdot 326 \cdot 10^{-6}}{3732 \cdot 10^{-8} \cdot 0,54 \cdot 10^{-2}} = 15 \text{ МПа}; \quad (5.70)$$

$$0,87 \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} = 0,87 \cdot \sqrt{166^2 + 3 \cdot 15^2} = 146 \text{ МПа} <$$

$$< R_y \gamma_c = 270 \cdot 0,9 = 243 \text{ МПа}; \quad (5.71)$$

$$\sigma_2 = \frac{M_{2,I} d_c}{J_{x,o}} + \frac{Q_{2,I} a}{2 W_{sup,min}} \pm \frac{M_y}{W_y} = \frac{41,4 \cdot 10^3 \cdot 6,6 \cdot 10^{-2}}{3732 \cdot 10^{-8}} +$$

$$+ \frac{0,5 \cdot 9,11 \cdot 10^3 \cdot 0,1}{2 \cdot 8,5 \cdot 10^{-6}} = 100 \text{ МПа} < \frac{R_u \gamma_c}{\gamma_u} = \frac{270 \cdot 0,9}{1,0} = 243 \text{ МПа}; \quad (5.72)$$

$$0,87 \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} = 0,87 \cdot \sqrt{100^2 + 3 \cdot 15^2} = 90 \text{ МПа} <$$

$$< R_y \gamma_c = 270 \cdot 0,9 = 243 \text{ МПа}; \quad (5.73)$$

д) ділянка 3 в перерізі без отвору:

$$M_3 = \left( \frac{3ql}{2} - \frac{3^2 q}{2} \right) \cos(15^\circ - 13^\circ) = \left( \frac{3 \cdot 10,14 \cdot 6}{2} - \frac{9 \cdot 10,14}{2} \right) \cos 2^\circ = 45,6 \text{ кН/м}; \quad (5.74)$$

$$Q_3 = 0 \text{ кН}; \quad (5.75)$$

$$\sigma_5 = \frac{M_3 h_c}{J_{x,m}} \pm \frac{M_y}{W_y} = \frac{45,6 \cdot 10^3 \cdot 14,3 \cdot 10^{-2}}{3835 \cdot 10^{-8}} = 170 \text{ МПа} < R_y \gamma_c = 270 \cdot 0,9 = 243 \text{ МПа}; \quad (5.76)$$

е) ділянка 3 в перерізі послабленому отвором:

$$M_{2,9} = \left( \frac{2,9ql}{2} - \frac{2,9^2 q}{2} \right) \cos(15^\circ - 13^\circ) = \left( \frac{2,9 \cdot 10,14 \cdot 6}{2} - \frac{2,9^2 \cdot 10,14}{2} \right) \times \\ \times \cos 2^\circ = 40,3 \text{ кН} / \text{м}; \quad (5.77)$$

$$Q_{2,9} = \left( \frac{ql}{2} - 2,9q \right) \cos(15^\circ - 13^\circ) = \left( \frac{10,14 \cdot 6}{2} - 2,9 \cdot 10,14 \right) \cos 2^\circ = 1 \text{ кН}; \quad (5.78)$$

$$\sigma_1 = \frac{M_{2,9} h_c}{J_{x,o}} + \frac{Q_{2,9} a}{2 W_{sup,max}} \pm \frac{M_y}{W_y} = \frac{40,3 \cdot 10^3 \cdot 14,3 \cdot 10^{-2}}{3732 \cdot 10^{-8}} + \\ + \frac{0,5 \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 0,1}{2 \cdot 30,1 \cdot 10^{-6}} = 155 \text{ МПа} < R_y \gamma_c = 270 \cdot 0,9 = 243 \text{ МПа}; \quad (5.79)$$

$$\sigma_2 = \frac{M_{2,9} d_c}{J_{x,o}} + \frac{Q_{2,9} a}{2 W_{sup,min}} \pm \frac{M_y}{W_y} = \frac{40,3 \cdot 10^3 \cdot 6,6 \cdot 10^{-2}}{3732 \cdot 10^{-8}} + \\ + \frac{0,5 \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 0,1}{2 \cdot 8,5 \cdot 10^{-6}} = 74 \text{ МПа} < \frac{R_u \gamma_c}{\gamma_u} = \frac{380 \cdot 0,9}{1,0} = 342 \text{ МПа}; \quad (5.80)$$

Підібраний переріз перфорованого прогону задовольняє вимогам розрахунку.

У формулах кут  $\alpha = 15^\circ$  – кут нахилу покрівлі; кут  $\gamma = 13^\circ$  – кут нахилу головних осей інерції до центральних осей перерізу (див. рис. 5.2, б, в), тому  $\cos(15^\circ - 13^\circ) = \cos 2^\circ$  – кут між головними осями інерції перерізу і силовою площиною;  $M_{0,9}; M_1; M_2; Q_{0,9}; Q_1; Q_2$  і т.д. – відповідно згинаючі моменти та поперечні сили у перерізах, які розміщені на відстані від опори прогону на 0,9; 1; 2 і так далі метри відповідно.

Маса прогону довжиною  $l = 6 \text{ м}$  складає  $m = m_2 l = 21 \cdot 6 = 126 \text{ кг}$ , де  $m_2 = 21 \text{ кг}$  – маса 1 п. м. № 22У/ДСТУ 3436-96.

### 5.3.2.2. Підбір перерізу балок 2-го і 3-го класів

Порядок розрахунку

1) На першому етапі розрахунку прийнято значення коефіцієнтів  $c_x = 1,1$  і  $\beta = 1$  та визначають необхідний момент опору вихідного швелера для перфорованого прогону з урахуванням кута нахилу покрівлі

$$W_{nec} = \frac{M \cos 15^\circ}{c_x \beta k R_y \gamma_c / \gamma_n} = \frac{45,6 \cdot 10^3 \cdot 0,9659}{1,1 \cdot 1 \cdot 1,3 \cdot 270 \cdot 10^6 \cdot 0,9 / 0,95} = 122 \text{ см}^3, \quad (5.81)$$

де  $k=1,3$  – попередньо прийняте значення коефіцієнта висоти розвитку перерізу відповідно до даних табл. А.5 і А.6 додатку А.

2) За необхідним моментом опору з сортаменту прийнято номер вихідного швелера № 20У/ДСТУ 3436-96.

3) Геометричні характеристики перфорованого профілю (див. рис. 5.2) відповідно до розробленого алгоритму розрахунку визначено за формулами наведеними у пункті 5.3.1.1:

а) переріз послаблений отвором (переріз 2-2):

$$\begin{aligned} H &= 26 \text{ см}; \quad d = 12 \text{ см}; \quad h_1 = 7 \text{ см}; \quad A_1 = 10 \text{ см}^2; \quad y_c = 5,4 \text{ см}; \quad z_c = 2,7 \text{ см}; \quad \gamma = 13^\circ; \\ z_1 &= 1,6 \text{ см}; \quad I_1 = 36,8 \text{ см}^4; \quad I_{x,o} = 2695 \text{ см}^4; \quad W_{sup,min} = 6,7 \text{ см}; \\ W_{sup,max} &= 23,6 \text{ см}; \quad S_{x,o} = 130 \text{ см}^3. \end{aligned}$$

б) переріз без отвору (переріз 1-1):

$$\begin{aligned} H &= 26 \text{ см}; \quad A = 26,3 \text{ см}^2; \quad y_c = 13 \text{ см}; \quad z_c = 7,3 \text{ см}; \quad I_{x,m} = 2769 \text{ см}^4; \\ S_{x,m} &= 341,9 \text{ см}^3. \end{aligned}$$

13) Жорсткість балки

$$\frac{f}{l} = \frac{5}{384} \frac{q_e \cos(15^\circ - 13^\circ) l^3}{EI_x} = \frac{5 \cdot 10,14 \cdot 10^3 \cdot 6^3 \cdot 0,9994}{384 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 2695 \cdot 10^{-8}} = \frac{1}{195} > \frac{f_u}{l} = \frac{1}{200}. \quad (5.82)$$

Умова не виконується.

14) Прийнято наступний номер профілю № 22У/ДСТУ 3436-96, для якого  $I_x = 2110 \text{ см}^4$ ;  $W_x = 192 \text{ см}^3$ ;  $S_x = 110 \text{ см}^3$ ;  $h = 22 \text{ см}$ ;  $t_f = 0,95 \text{ см}$ ;  $t_w = 0,54 \text{ см}$ ;  $b_f = 8,2 \text{ см}$ .

15) Геометричні характеристики (див. рис. 5.2) перфорованого профілю відповідно до розробленого алгоритму розрахунку визначено за формулами наведеними у пункті 5.3.1.1:

а) переріз послаблений отвором (переріз 2-2):

$$H = 28,6 \text{ см}; \quad d = 13,2 \text{ см}; \quad h_1 = 7,7 \text{ см}; \quad A_1 = 11,4 \text{ см}^2; \quad y_c = 6 \text{ см}; \quad z_c = 2,9 \text{ см};$$

$$\xi = 13^\circ; \quad z_1 = 1,7 \text{ см}; \quad I_I = 51,2 \text{ см}^4; \quad I_{x,o} = 3732 \text{ см}^4; \quad W_{sup,min} = 8,5 \text{ см};$$

$$W_{sup,max} = 30,1 \text{ см}; \quad S_{x,o} = 326 \text{ см}^3.$$

б) переріз без отвору (переріз 1-1):

$$H = 28,6 \text{ см}; \quad A = 30 \text{ см}^2; \quad y_c = 14,3 \text{ см}; \quad z_c = 7,9 \text{ см}; \quad I_{x,m} = 3835 \text{ см}^4;$$

$$S_{x,m} = 429 \text{ см}^3.$$

16) Жорсткість балки:

$$\frac{f}{l} = \frac{5}{384} \frac{q_e \cos(15^\circ - 13^\circ) l^3}{EI_x} = \frac{5 \cdot 10,14 \cdot 10^3 \cdot 6^3 \cdot 0,9994}{384 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 3732 \cdot 10^{-8}} = \frac{1}{270} < \frac{f_u}{l} = \frac{1}{200}. \quad (5.83)$$

Умова виконується.

17) Відстань між поперечними в'язями для закріплення прогону з площини

$$l_{ef} = b_f \left[ 0,35 + 0,0032 \frac{b_f}{t_f} + \left( 0,76 - 0,02 \frac{b_f}{t_f} \right) \frac{b_f}{h_0} \right] \sqrt{\frac{E}{R_y}} =$$

$$= 7,6 \cdot \left( 0,35 + 0,0032 \cdot 15 + (0,76 - 0,02 \cdot 15) \frac{7,6}{24,2} \right) \sqrt{\frac{2,06 \cdot 10^{11}}{270 \cdot 10^6}} = 114 \text{ см} = 1,1 \text{ м}. \quad (5.84)$$

18) Дотичні напруження

$$\tau = \frac{Q \cos(15^\circ - 13^\circ)}{t_w h_w} = \frac{30,4 \cdot 10^3 \cdot 0,9994}{0,54 \cdot 10^{-2} \cdot 26,7 \cdot 10^{-2}} = 21,1 \text{ МПа} < R_s \gamma_c / \gamma_n =$$

$$= 0,58 R_y \gamma_c / \gamma_n = 0,58 \cdot 270 \cdot 0,9 / 0,95 = 148,4 \text{ МПа}, \quad (5.85)$$

де  $h_w = H - 2t_f = 28,6 - 2 \cdot 0,95 = 26,7 \text{ см}$ .

Оскільки  $\tau = 21,1 \text{ МПа} < 0,5 R_s = 0,5 \cdot 148,4 = 74,2 \text{ МПа}$ , то  $\beta = 1$ .

19) Співвідношення

$$\alpha = \frac{A_f}{A_w} = \frac{7,79}{8,3} = 0,93, \quad (5.86)$$

де  $A_f = b_f t_f = 8,2 \cdot 0,95 = 7,79 \text{ см}^2$ ;  $A_w = 2h_1 t_w = 2 \cdot 7,7 \cdot 0,54 = 8,3 \text{ см}^2$ .

20) З табл. Н.1 додатку Н [113] для типу перерізу 1 для співвідношення  $A_f / A_w = 0,93$  шляхом інтерполяції визначено точне значення коефіцієнта  $c_x$ , яке становить  $c_x = 1,077$ .

21) Для виконання перевірки міцності використано значення внутрішніх зусиль, визначених раніше у цьому розділі (див. пункт 5.3.1.1, підпункт 9):

а) ділянка 1 в перерізі без отвору:

$$\sigma_5 = \frac{M_{0,9} h_c}{c_x \beta J_{x,m}} + \frac{Q_{0,9} a}{2 W_{sup,max}} \pm \frac{M_y}{c_y \beta W_y} = \frac{23,3 \cdot 10^3 \cdot 14,3 \cdot 10^{-2}}{1,077 \cdot 3835 \cdot 10^{-8}} = 81 \text{ МПа} <$$

$$< R_y \gamma_c / \gamma_n = 270 \cdot 0,9 / 0,95 = 255,8 \text{ МПа}; \quad (5.87)$$

б) ділянка 1 в перерізі послабленому отвором:

$$\sigma_1 = \frac{M_I h_c}{c_x \beta J_{x,o}} + \frac{Q_I a}{2 W_{sup,max}} \pm \frac{M_y}{c_y \beta W_y} = \frac{25,3 \cdot 10^3 \cdot 14,3 \cdot 10^{-2}}{1,077 \cdot 3732 \cdot 10^{-8}} +$$

$$+ \frac{0,5 \cdot 20,2 \cdot 10^3 \cdot 0,1}{2 \cdot 30,1 \cdot 10^{-6}} = 107 \text{ МПа} < R_y \gamma_c / \gamma_n = 270 \cdot 0,9 / 0,95 = 255,8 \text{ МПа}; \quad (5.88)$$

$$\sigma_2 = \frac{M_I d_c}{c_x \beta J_{x,o}} + \frac{Q_I a}{2 W_{sup,min}} \pm \frac{M_y}{c_y \beta W_y} = \frac{25,3 \cdot 10^3 \cdot 6,6 \cdot 10^{-2}}{1,077 \cdot 3732 \cdot 10^{-8}} +$$

$$+ \frac{0,5 \cdot 20,2 \cdot 10^3 \cdot 0,1}{2 \cdot 8,5 \cdot 10^{-6}} = 101 \text{ МПа} < \frac{R_u \gamma_c}{\gamma_u} = \frac{380 \cdot 0,9}{1,0} = 342 \text{ МПа}; \quad (5.89)$$

в) ділянка 2 в перерізі без отвору:

$$\sigma_5 = \frac{M_2 h_c}{c_x \beta J_{x,m}} + \frac{Q_2 a}{2 W_{sup,max}} \pm \frac{M_y}{c_y \beta W_y} = \frac{40,5 \cdot 10^3 \cdot 14,3 \cdot 10^{-2}}{1,077 \cdot 3835 \cdot 10^{-8}} = 140 \text{ МПа} < R_y \gamma_c / \gamma_n = 270 \cdot 0,9 / 0,95 = 256 \text{ МПа}; \quad (5.90)$$

$$\tau_{xy} = \frac{Q_2 S_{x,m}}{I_{x,m} t_w} = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 429 \cdot 10^{-6}}{3835 \cdot 10^{-8} \cdot 0,54 \cdot 10^{-2}} = 20,7 \text{ МПа}; \quad (5.91)$$

$$0,87 \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} = 0,87 \cdot \sqrt{140^2 + 3 \cdot 20,7^2} = 126 \text{ МПа} < R_y \gamma_c / \gamma_n = 270 \cdot 0,9 / 0,95 = 256 \text{ МПа}; \quad (5.92)$$

г) ділянка 2 в перерізі послабленому отвором:

$$\sigma_1 = \frac{M_{2,1} h_c}{c_x \beta J_{x,o}} + \frac{Q_{2,1} a}{2 W_{sup,max}} \pm \frac{M_y}{c_y \beta W_y} = \frac{41,4 \cdot 10^3 \cdot 14,3 \cdot 10^{-2}}{1,077 \cdot 3732 \cdot 10^{-8}} + \frac{0,5 \cdot 9,1 \cdot 10^3 \cdot 0,1}{2 \cdot 30,1 \cdot 10^{-6}} = 155 \text{ МПа} < R_y \gamma_c / \gamma_n = 270 \cdot 0,9 / 0,95 = 256 \text{ МПа}; \quad (5.93)$$

$$\tau_{xy} = \frac{Q_2 S_{x,o}}{I_{x,o} t_w} = \frac{9,1 \cdot 10^3 \cdot 326 \cdot 10^{-6}}{3732 \cdot 10^{-8} \cdot 0,54 \cdot 10^{-2}} = 15 \text{ МПа}; \quad (5.94)$$

$$0,87 \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} = 0,87 \cdot \sqrt{155^2 + 3 \cdot 15^2} = 137 \text{ МПа} < R_y \gamma_c / \gamma_n = 270 \cdot 0,9 / 0,95 = 256 \text{ МПа}; \quad (5.95)$$

$$\sigma_2 = \frac{M_{2,1} d_c}{c_x \beta J_{x,o}} + \frac{Q_{2,1} a}{2 W_{sup,min}} \pm \frac{M_y}{c_y \beta W_y} = \frac{41,4 \cdot 10^3 \cdot 6,6 \cdot 10^{-2}}{1,077 \cdot 3732 \cdot 10^{-8}} + \frac{0,5 \cdot 9,1 \cdot 10^3 \cdot 0,1}{2 \cdot 8,5 \cdot 10^{-6}} = 95 \text{ МПа} < \frac{R_u \gamma_c}{\gamma_u} = \frac{380 \cdot 0,9}{1,0} = 342 \text{ МПа}; \quad (5.96)$$

$$0,87 \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} = 0,87 \cdot \sqrt{95^2 + 3 \cdot 15^2} = 86 \text{ МПа} < R_y \gamma_c / \gamma_n = 270 \cdot 0,9 / 0,95 = 256 \text{ МПа}; \quad (5.97)$$

д) ділянка 3 в перерізі без отвору:

$$\sigma_5 = \frac{M_3 h_c}{c_x \beta J_{x,m}} \pm \frac{M_y}{c_y \beta W_y} = \frac{45,6 \cdot 10^3 \cdot 14,3 \cdot 10^{-2}}{1,077 \cdot 3835 \cdot 10^{-8}} = 158 \text{ МПа} <$$



$$< R_y \gamma_c / \gamma_n = 270 \cdot 0,9 / 0,95 = 256 \text{ МПа}; \quad (5.98)$$

е) ділянка 3 в перерізі послабленому отвором:

$$\sigma_1 = \frac{M_{2,9} h_c}{c_x \beta J_{x,o}} + \frac{Q_{2,9} a}{2 W_{sup,max}} \pm \frac{M_y}{c_y \beta W_y} = \frac{40 \cdot 10^3 \cdot 14,3 \cdot 10^{-2}}{1,077 \cdot 3732 \cdot 10^{-8}} +$$

$$+ \frac{0,5 \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 0,1}{2 \cdot 30,1 \cdot 10^{-6}} = 143 \text{ МПа} < R_y \gamma_c / \gamma_n = 270 \cdot 0,9 / 0,95 = 256 \text{ МПа}; (5.99)$$

$$\sigma_2 = \frac{M_{2,9} d_c}{J_{x,o}} + \frac{Q_{2,9} a}{2 W_{sup,min}} \pm \frac{M_y}{W_y} = \frac{40 \cdot 10^3 \cdot 6,6 \cdot 10^{-2}}{1,077 \cdot 3732 \cdot 10^{-8}} +$$

$$+ \frac{0,5 \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 0,1}{2 \cdot 8,5 \cdot 10^{-6}} = 67 \text{ МПа} < \frac{R_u \gamma_c}{\gamma_u} = \frac{380 \cdot 0,9}{1,0} = 342 \text{ МПа}. \quad (5.100)$$

Підібраний переріз перфорованого прогону задовольняє вимогам розрахунку.

Маса прогону довжиною  $l = 6 \text{ м}$  складає  $m = m_2 l = 21 \cdot 6 = 126 \text{ кг}$ , де  $m_2 = 21 \text{ кг}$  – маса 1 п. м. № 22У/ДСТУ 3436-96.

Результати розрахунку суцільного профілю і перфорованого прогону зведено у табл. 5.1. Окрім того, за аналогічною методикою було додатково проведено розрахунок перфорованого прогону, виготовленого з вихідного швелера № 20У/ДСТУ 3436-96 з коефіцієнтом розвитку висоти профілю  $k = 1,35$ , що дозволило досягти більшої економії матеріалу порівняно з вихідним профілем № 22У/ДСТУ 3436-96.

Таблиця 5.1 – Результати розрахунку

Тип перерізу	Клас балок	Нормальні напруження, МПа									№	$f$ , мм
		Ділянка 1			Ділянка 2			Ділянка 3				
		1	2	5	1	2	5	1	2	5		
Суцільний	1	-	-	-	-	-	-	-	-	182	24	28
	2 і 3	-	-	-	-	-	-	-	-	166	24	28
Перфорований	1	114	104	87	166	100	151	155	74	170	22	22
	2 і 3	107	101	81	155	95	140	143	67	158	22	22
Перфорований, якщо $k = 1,35$	2 і 3	134	144	97	168	118	151	175	94	190	20	29

Отже, маса суцільного прогону виготовленого зі швелера № 24У/ДСТУ 3436-96 складає  $m_c = m_1 l = 24 \cdot 6 = 144 \text{ кг}$ , а перфорованого виготовленого зі швелера № 22У/ДСТУ 3436-96  $m_{n1} = m_2 l = 21 \cdot 6 = 126 \text{ кг}$ , що дозволяє зекономити  $m = m_c - m_{n1} = 144 - 126 = 18 \text{ кг}$ . Маса перфорованого прогону виготовлено з профілю № 20У/ДСТУ 3436-96 становить  $m_{n2} = m_3 l = 18,4 \cdot 6 = 110 \text{ кг}$ , що економить  $m = m_c - m_{n2} = 144 - 110 = 34 \text{ кг}$  металу на кожний елемент.

#### 5.4. Висновки до розділу 5

1) Виконані числові дослідження підтвердили правильність розробленої методики розрахунку сталевих перфорованих прогонів Z-подібного профілю, який працює в умовах косого згину і який повністю задовольняє умовам міцності і жорсткості.

2) Розрахунок перфорованих елементів, що згинаються, як балок 2-го і 3-го класів, тобто у пружно-пластичній стадії роботи матеріалу, не дозволяє отримати суттєвої економії матеріалу, порівняно з балками 1-го класу, оскільки менші вихідні профілі не задовольняють умовам розрахунку конструкцій за граничними станами II групи.

3) Економія матеріалу для прогонів, розрахованих за запропонованою в дисертаційній роботі методикою розрахунку порівняно з вихідним прокатним профілем у вигляді швелера, дозволяє досягти щонайменше 18 кг на одну конструкцію, а у випадку збільшення коефіцієнта розвитку висоти перерізу з 1,3 до 1,35 – 34 кг на один елемент, що становить 27% порівняно з вихідним профілем.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1) В дисертаційній роботі на основі аналізу існуючих конструктивних рішень перфорованих конструкцій та експериментально-теоретичних досліджень їх напружено-деформованого стану запропоновано та обґрунтовано конструктивну форму перфорованого прогону у вигляді Z-подібного профілю

2) Встановлено можливість використання методу скінчених елементів, реалізованого в програмному комплексі „Ліра”, для визначення напружень в характерних перерізах перфорованого прогону Z-подібного профілю в умовах косого згину. Розбіжність між результатами обчислень за чинними нормами проектування [115] і МСЕ на 1-й, 2-й і 3-й розрахункових ділянках становить відповідно 21 %, 13 % і 9 %, що свідчить про необхідність корегування формул зазначених норм для обчислення напружень в характерних точках перерізів, особливо на ділянці 1, де має місце велика поперечна сила і малий згинаючий момент.

3) Розроблено конструкцію дослідного зразка перфорованого прогону Z-подібного профілю довжиною 6 м на основі вихідного швелера №22У/ДСТУ 3436–96 з коефіцієнтом розвитку висоти перерізу 1,2 та дослідну установку, яка дозволяє закріпити конструкцію в площині та із площини відповідно до прийнятої розрахункової схеми та виконувати експериментальні дослідження згинальних елементів прольотом 6 м в умовах поперечного і косого згинів з можливістю зміни кута нахилу в діапазоні  $0^{\circ} \dots 25^{\circ}$  відповідно до ухилу покрівлі будівлі.

4) Вперше отримано нові експериментальні дані про напружено-деформований стан перфорованих елементів Z-подібного профілю, що працюють в умовах косого згину, в характерних точках поперечних перерізів з отворами і без отворів на трьох розрахункових ділянках по довжині прогону. Встановлено, що середні відхилення експериментальних значень від теоретичних, визначених за МСЕ, в характерних перерізах перфорованого прогону на 1-й, 2-й і 3-й розрахункових ділянках відповідно склали 14%, 9% і

7% в запас міцності конструкції. Сумарні експериментальні деформації перфорованого прогону Z-подібного профілю відрізняються від теоретичних в середньому на 9%. Значення деформацій в усіх характерних точках по довжині конструкції за дії розрахункового експлуатаційного навантаження  $F = 16,8 \text{ кН}$ , визначеного за граничними станами другої групи, не перевищували граничного прогину  $1/200 L$ , встановленого нормами проектування конструкцій і склали 28,27 мм. Руйнування перфорованого прогону відбулося через втрату місцевої стійкості полиці та стінки на третій ділянці конструкції, де має місце максимальний згинальний момент, що призвело до загальної втрати стійкості верхнього поясу прогону на ділянці між точками закріплення. Коефіцієнт запасу за деформаціями склав 1,1.

5) Запропоновано формули для визначення напружень в характерних точках перфорованих елементів з отворами і без них в умовах косого згину для розрахунку з урахуванням та без урахування пружно-пластичних деформацій. Визначено деформації конструкції перфорованого Z-подібного профілю та положення лінії деформування відносно головних центральних осей перерізу, нейтральної осі та площини дії повного згинаючого моменту, залежно від відстані між точками закріплення із площини конструкції.

6) Розроблено алгоритм, блок-схему та методику розрахунку перфорованого Z-подібного прогону за граничними станами I та II груп для балок 1, 2 та 3-го класів симетричного та несиметричного перерізів для моно- та бісталевих елементів з урахуванням та без урахування закріплень конструкції із площини дії навантажень. На цій основі виконано числові дослідження у вигляді прикладу розрахунку прогону прольотом 6 м за дії реальних навантажень на конструкцію.

7) За результатами експериментально-теоретичних досліджень розроблено та видано рекомендації щодо розрахунку перфорованого прогону Z-подібного профілю в умовах косого згину за граничними станами I і II груп, які впроваджено в навчальний процес та в практику проектування конструкцій покриття.

### Список використаних джерел

1. Ааре И. И. Основные указания по проектированию тонкостенных металлических балок // Труды ТПИ, серия А. – № 296. – Талин, 1970. – С. 5–15.
2. Ааре И. И. Расчет и проектирование тонкостенных металлических балок // Труды ТПИ, серия А. – № 259. – Талин, 1968. – С. 39–50.
3. Айрумян Э. Л. Легкие стальные каркасы из оцинкованных гнутых профилей для одноэтажных зданий массового применения / Э. Л. Айрумян, В. Ф. Беляев, А. А. Каганов, И. А. Румянцева // Промышленное и гражданское строительство. – № 6. – 2003. – С. 23–24.
4. Айрумян Э. Л. Легкие стальные конструкции зданий с применением гнутых профилей. Обзор / Э. Л. Айрумян, А. В. Рожков. – Сер. 8 – Вып. 2. – М. : ВНИИС, 1987. – С. 77–82.
5. Бабич В. І. Таблиці для проектування будівельних конструкцій: Довідник / В. І. Бабич, В. І. Огороднік, В. В. Романюк. – Рівне, 1999. – 506 с., 394 табл., бібліогр. 35 назв.
6. Бакиев М. В. Оптимизация геометрических параметров стальных конструкций покрытий производственных зданий / М. В. Бакиев // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1986. – № 2. – С. 21–25.
7. Банинчук Н. В. Об оптимальных неравнопрочных формах поперечных сечений балок / Н. В. Банинчук, В. В. Кобелев // Известия АН СССР „Механика твердых тел”. – 1983. – № 5. – С. 162–167.
8. Беленя Е. И. Металлические конструкции: Спец. курс. – 7-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1991. – 687 с.
9. Белый Г. И. Пространственная устойчивость элементов конструкций из стальных холодногнутох профилей / Г. И. Белый, И. В. Астахов // Монтажные и специальные работы в строительстве. – № 9. – М., 2006–С.37–38.

10. Беляев В. Ф. Эффективные виды стальных профилей для строительных конструкций: Обзор / В. Ф. Беляев. – М. : ВНИИС, 1988. – 37 с.
11. Билык С. И. Стальные колонны с перфорированной стенкой переменной высоты для бескрановых производственных зданий : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.01 „Будівельні конструкції, будівлі та споруди” / С. И. Билык. – Київ, 1987. – 20 с.
12. Бирюлев В. В. Перспективы развития и пути повышения эффективности легких металлических конструкций / В. В. Бирюлев // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1985. – № 10. – С. 1–4.
13. Бирюлев В. В. Проектирование металлических конструкций: Спец. курс. учеб. пособие для вузов / В. В. Бирюлев, И. И. Кошин, И. И. Крылов, А. В. Сильвестров. – Л. : Стройиздат, 1990. – 432 с., ил.
14. Бирюлев В. В. Экспериментальное исследования неразрезных сквозных двутавровых балок с регулированием напряжений / В. В. Бирюлев, В. М. Добрачев // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1981. – № 11. – С. 224–237.
15. Бельский Г. Е. Методика определения размеров сечений стальных балок минимальной массы / Г. Е. Бельский // ЦНИИСК им. Кучеренко В. А.: Новые формы и прочность металлических конструкций: Сборник научных трудов. – М., 1989. – С. 116–129.
16. Бельский Г. Е. Оптимизация сечений – важный резерв снижения расхода материала в стальных балках / Г. Е. Бельский, В. С. Тamarченко // Строительная механика и расчет сооружений. – 1990. – № 1. – С. 83–88.
17. Беляев В. Ф. Стальные каркасные конструкции одноэтажных промышленных зданий: Обзорная информация. Серия „Строительные конструкции” / В. Ф. Беляев. – М. : ВНИИНТПИ Госстроя СССР, 1989. – Вып. 7. – 68 с.
18. Берлинов М. В. Строительные конструкции / М. В. Берлинов, Б. А. Ягунов. – М. : Агропромиздат, 1990. – 430 с.

19. Богданова Е. Н. Легкие металлические конструкции полносборных зданий (Канада, Финляндия, ФРГ): Экспресс-информация. Зарубежный и отечественный опыт / Е. Н. Богданова // Серия „Строительные конструкции и материалы”. – М. : ВНИИНТПИ Госстроя СССР. – 1991. – Вып. 12. – С. 2–7.
20. Брутка Я. Стальные складчатые конструкции в строительстве / Я. Брутка. – К. : Будівельник, 1989. – 152 с.
21. Брутка Я. Легкие стальные конструкции (Сокращенный перевод с польского Л. Д. Янской) изд. 2-е, дополненное / Я. Брутка, М. Лубинский. – М. : Стройиздат, 1974. – 344 с. с ил.
22. Васильев А. А. Металлические конструкции. 3-е изд., перераб. и доп. / А. А. Васильев. – М. : Стройиздат, 1979. – 472 с.
23. Гогеашвили А. А. Расчет на прочность сжато-изогнутого элемента из развитого двутавра / А. А. Гогеашвили, В. А. Громацкий, Г. М. Каплун // Сб. науч. трудов. Строительные конструкции. – М. : ЦНИИЭПсельстрой. – 1974. – № 9. – С. 3–10.
24. Гогеашвили А. А. Экономичные несущие стальные конструкции / А. А. Гогеашвили, В. А. Громацкий. – М. : Сельское строительство, 1974. – 325 с.
25. Городецкий А. С. Метод конечных элементов: Теория и численная реализация. Программный комплекс „Ли́ра – Windows” / [А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров, Е. Б. Стрелецкий и др.]. – К. : ФАКТ, 1997. – 137 с.
26. Горохов Е. В. Снижение деформаций при роспуске широкополочных двутавров на тавры / Е. В. Горохов, В. Н. Васильев // Сварочное производство. – 1985. – № 3. – С. 28–34.
27. Гринберг М. Л. Легкі металеві конструкції в Україні / [М. Л. Гринберг, І. М. Лебедич, В. В. Холькін та ін.] // Будівництво України. – 1998. – № 3. – С. 19–22.

28. Громацкий В. А. Разработка, исследование и внедрение конструкций из развитого двутавра в сельском строительстве / В. А. Громацкий, Л. П. Чекалев, Г. М. Каплан // Реф. сб. Общие вопросы строительства (отечественный опыт). – 1974. – Вып. 7. – С. 48–52.
29. Дарипаско В. М. Прочность и устойчивость двутавровых элементов с перфорированной стенкой при общем случае загрузки : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.01 „Строительные конструкции, здания и сооружения” / В. М. Дарипаско. – Санкт-Петербург, 2000. – 23 с.
30. Добрачев В. М. Пути повышения эффективности стальных балок с перфорированной стенкой : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.01 „Строительные конструкции, здания и сооружения” / В. М. Добрачев. – Новосибирск, 1982. – 19 с.
31. Дорошук Г. П., Трач В. М. Основи будівельної механіки : Підручник. – Рівне : УДУВГП, 2003. – 504 с., іл. 218, табл. 70, бібліогр. 12 назв.
32. Дробязко Л. Е. Исследование области рационального применения и выбора типов стальных конструкций каркасов сельскохозяйственных производственных зданий : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.01 „Строительные конструкции, здания и сооружения” / Л. Е. Дробязко. – К., 1980. – 20 с.
33. Дробязко Л. Е. Легкие конструкции сельскохозяйственных зданий / Л. Е. Дробязко. – К : Будівельник, 1985. – 136 с.
34. Дробязко Л. Е. Новые металлоконструкции для каркасов сельскохозяйственных зданий // Тез. докл. на Укр. респ. науч.-техн. конф. в г. Жданове. – К. : КИСИ. – 1978. – С. 74–75.
35. Дробязко Л. Е. Птахоферми / Л. Е. Дробязко, Ю. А. Куров, В. В. Терпелюк. – К. : Будівельник, 1971. – 71 с.
36. Дробязко Л. Е. Прогрессивные металлические конструкции зданий сельскохозяйственного назначения // Совершенствование сварных



- металлических конструкций / Под ред. М. М. Жербина, АН Украины, ин-т электросварки им. Патона Е. О. – К. : Наукова думка, 1992. – с. 104–110.
37. Дукарский Ю. М. Исследование облегченных конструкций из развитых двутавров / Ю. М. Дукарский, А. В. Руссоник // Промышленное строительство. – 1975. – № 12. – С. 38–39.
38. Енджиевский Л. В. Каркасы зданий из легких металлических конструкций и их элементы: Учебное пособие / Л. В. Енджиевский, В. Д. Неделяев, И. Я. Петухова. – М. : Издательство АСВ, 1998. – 247 с., ил.
39. Жербін М. М. Застосування легких та особливо легких сталевих конструкцій у швидкоспоруджуваних універсальних будівлях / М. М. Жербін // Будівництво України. – 1994. – № 5, 6. – С. 32–35.
40. Жербин М. М. Натурное испытание фрагмента стального каркаса сельскохозяйственного производственного здания / [М. М. Жербин, П. Е. Бабичев, Л. Е. Дробязко и др.] // Сопротивление материалов и теория сооружений. – 1974. – № 34 – С. 98–100.
41. Жербин М. М., Владимирский В. А. Металлические конструкции: Учеб. пособие для вузов. – К. : Вища школа, 1986. – 215 с.
42. Жербин М. М. Особо легкие сварочные стальные конструкции для сельского строительства / М. М. Жербин, Л. Е. Дробязко, В. Г. Набойченко // Тез. докл. V Всесоюзн. конф. в г. Макеевке. – М. : Стройиздат. – 1983. – С. 25–26.
43. Жербін М. М. Застосування легких та особливо легких сталевих конструкцій у швидко споруджуваних універсальних будівлях / М. М. Жербін // Будівництво України. – 1994. – № 5–6. – С. 32–35.
44. Жербин М. М. Натурные экспериментальные исследования особо легких стальных конструкций (ОЛСК) производственных зданий / М. М. Жербин, В. С. Чернолоз, А. И. Налепя, С. И. Билык // Тезисы докл.

- всесоюзн. научно-техн. совещания „Экспериментальные исследования и испытания строительных металлоконструкций”. – Львов, 1987. – С. 7–8.
45. Жербин М. М. Некоторые пути создания особо легких стальных конструкций производственных зданий / М. М. Жербин, А. И. Налеп, В. С. Чернолоз // Тез. докл. научно-техн. конф. „Достижения строительной науки – производству”. – Ровно : НТО Стройиндустрия, 1984. – С. 11–12.
46. Жербин М. М. Особо легкие стальные конструкции промышленных зданий / М. М. Жербин, А. И. Налеп, В. С. Чернолоз // Тезисы докл. республ. научно-техн. конф. „Пути интенсификации строительства на стадиях планирования и проектирования”. – Вильнюс : ВИСИ, 1986. – С. 24–26.
47. Жербин М. М. Проблема создания особо легких стальных конструкций в строительстве // Тез. докл. III Урк. респ. научн.-техн. конф.: Перспективы развития и пути повышения эффективности применения легких и особо легких металлических конструкций. – 1993. – № 4. – С. 25–31.
48. Жербин М. М. Совершенствование конструктивных форм стальных строительных конструкций на основе перфорированных двутавров / М. М. Жербин, А. И. Налеп, В. С. Чернолоз, О. Ф. Данильченко // Тез. докл. конф. „Резервы научно-технического прогресса в строительстве”. – Вильнюс : ВИСИ, 1986. – С. 12–13.
49. Жербин М. М. Стальные подкрановые балки минимальной массы из развитых двутавров с переменной высотой стенки / М. М. Жербин, В. С. Чернолоз // Международный „Действительная работа подкрановых балок”. – Братислава, ЧССР, Словацкая высшая техническая школа, 1987. – С. 24–26.
50. Жербин М. М. Эффективные стальные каркасы массовых однопролетных производственных зданий / М. М. Жербин, С. И. Билык,

- А. В. Тихоновский // Совершенствование сварных металлических конструкций. – Киев : Наукова думка, 1992. – С. 94–104.
51. Заборский А. А. Сквозные двутавры с шахматной перфорацией стенки / А. А. Заборский, В. А. Песков // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1987. – № 6. – С. 4–7.
  52. Ижевская Г. М. Строительные конструкции производственных сельскохозяйственных зданий: Металлические, из дерева и пластмасс / Г. М. Ижевская. – М. : Высш. школа, 1978. – 431с., ил.
  53. Ильина А. А. Прочность и устойчивость стальных изгибаемых элементов с регулярной и нерегулярной шахматной перфорацией стенки : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. : спец. 05.23.01 „Строительные конструкции, здания и сооружения” / А. А. Ильина. – Нижний Новгород, 2004. – 25 с.
  54. Инструкция по проектированию зданий из легких металлических конструкций: СН 454-76. – М. : Стройиздат, 1977. – 14 с.
  55. Ищенко И. И. Легкие металлические конструкции одноэтажных производственных зданий. Справочник проектировщика. / И. И. Ищенко, Е. Г. Кутухтин, В. М. Спиридонов, Ю. Н. Хромец. – М. : Стройиздат, 1979. – 196 с., ил.
  56. Каплун Я. А. Стальные конструкции из широкополочных двутавров и тавров / Я. А. Каплун. – М. : Стройиздат, 1981. – 143 с.
  57. Каталог унифицированных промышленных конструкций и изделий для сельскохозяйственного строительства в Украинской ССР. Утв. 16 дек. 1974 г. – К. : Будівельник, 1975. – 74 с. с рис.
  58. Клименко Ф. Є. Металеві конструкції: Підручник / Ф. Є. Клименко, Ф. Є. Барабаш, Л. І. Стороженко. – 2-е видання виправлене і доп. – Львів : Світ, 2002. – 312 с.
  59. Козлов А. И. Эпюры внутренних сил в балках, рамах и арках: Учеб. пособие для студентов всех специальностей ВЗИСИ. – М., 1966. – 91 с.

60. Конструкції сталеві будівельні. Методи випробування навантаженням : ДСТУ Б В.2.6–10–96. – Вид. офіц. К., 1997. – 20 с. (Держстандарт України).
61. Копытков М. М. Перфорированные стержни. / М. М. Копытков. – Томск. : Изд-во Томского ун-та, 1980. – 137 с., ил.
62. Кузнецов В. В. Изготовление легких металлических конструкций одноэтажных зданий США / В. В. Кузнецов // Промышленное строительство. – 1976. – № 1. – С. 24–26.
63. Кутухин Е. Г. Конструкции промышленных и сельскохозяйственных зданий и сооружений. / Е. Г. Кутухин, В. А. Коробков. – М. : Стройиздат, 1982. – 208 с., ил.
64. Лихтарников Я. М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций / Я. М. Лихтарников. – М. : Стройиздат, 1979. – 319 с., ил.
65. Лихтарников Я. М. Расчет стальных конструкций / Я. М. Лихтарников, Д. В. Ладыженский, В. М. Клыков. – К., 1984. – 368 с.
66. Лихтарников Я. М. Техничко-економические основы проектирования строительных конструкций / Я. М. Лихтарников, Н. С. Летников, В. Н. Левченко. – Киев – Донецк : Вища школа, Головное издательство, 1980. – 240 с.
67. Лихтарников Я. М. Металлические конструкции. Методы технико-экономического анализа при проектировании / Я. М. Лихтарников. – М. : Стройиздат, 1968. – 264 с.
68. Мельников Н. П. Металлические конструкции за рубежом / Н. П. Мельников. – М. : Госстройиздат, 1971. – 339 с., ил.
69. Мельников Н. П. Металлические конструкции: Современное состояние и перспективы развития / Н. П. Мельников. – М. : Стройиздат, 1983. – 543 с., ил.
70. Мельников Н. П. Металлические конструкции. Часть 1 / Н. П. Мельников. – М. : Стройиздат, 1978. – 267 с.

71. Мельников Н. П. Пути прогресса в области металлических конструкций / Н. П. Мельников. – М. : Стройиздат, 1974. – 136 с.
72. Мельников Н. П. Развитие легких металлических конструкций индустриального изготовления / Н. П. Мельников // Промышленное строительство. – 1975. – № 10. – С. 4–7.
73. Митчин Р. Б. Местная устойчивость стенки и оптимизация стальной перфорированной балки : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.01 „Будівельні конструкції, будівлі та споруди” / Р. Б. Митчин. – Липецк, 2003. – 26 с.
74. Мурашко Н. Н., Соболев Ю. В. Металлические конструкции производственных сельскохозяйственных зданий: Учеб. пособие для студентов вузов. – М. : Высшая школа, 1987. – 278 с., ил.
75. Муханов К. К. Металлические конструкции. Изд. 2-е перераб. и доп. / К. К. Муханов. – М. : Стройиздат, 1976. – 504 с.
76. Навантаження і впливи : ДБН В.1.2-2:2006. – Офіц. вид. – К. : Сталь, 2006. – 59 с. (Нормативний документ Мінбуду України. Норми проектування).
77. Налеп А. И. Стальная стропильная ферма с перфорированным верхним поясом переменной жесткости : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / А. И. Налеп. – К., 1989. – 20 с.
78. Немчинов Ю. И. Метод просторових скінчених елементів (з застосуванням до розрахунку будівель та споруд): Монографія. – К. : НДІБК, 1995. – 386 с.
79. Нілов О. О. Металеві конструкції. Балки. Колони: Навч. посібник для студентів будівельних спеціальностей. – К., 1997. – 232 с.
80. Нілов А. А. Стальные конструкции производственных зданий: Справочник / А. А. Нілов, В. А. Пермьяков, А. Я. Прицкер. – К. : Будівельник, 1986. – 270 с.

81. Область применения гнутосварных замкнутых профилей в металлических конструкциях промышленных зданий // Проектирование металлических конструкций: Реферативный сб. / Н. В. Левитанский, В. В. Севюгин, З. Р. Джафарова. – М. : ЦИНИС, 1969. – серия VII. – вып. 7/151. – С. 42 – 56.
82. Огороднов Б. Е. Некоторые вопросы расчета балок с перфорированной стенкой / Б. Е. Огороднов, В. В. Очинский, Д. М. Ротштейн // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1975. – № 10. – С. 194–206.
83. Ольков Я. И. Алгоритм автоматизированного оптимального проектирования металлических балок симметричного двутаврового сечения / Я. И. Ольков, В. Н. Алехин // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1986. – № 4. – С. 1–6.
84. Пермяков В. А. Необходимость учета компоновки поперечных сечений элементов при оптимальном проектировании конструкций // Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных и пластмассовых конструкций. Материалы международной научно-технической конференции. – Самара : САМГАСА, 1996. – С.17 – 19.
85. Пермяков В. О. Особливості конструктивних рішень каркасних будівель, що поставляються в Україну // Проблеми теорії і практики будівництва. Збірник наукових статей, т. II. – Львів, 1997. – С. 81–83.
86. Пермяков В. О. Про вибір цільової функції при оптимальному проектуванні металевих конструкцій // VI Міжнародна наукова конференція „Актуальні проблеми будівництва та інженерії докiлля” Львів-Кошице-Жешув: Збірник матеріалів конференції. – Ч.1 – Будівництво. – Львів : Видавництво Національного університету „Львівська політехніка”, 2001. – С. 176 – 182.
87. Применение легких конструкций – важное направление технического прогресса в строительстве // Легкие металлические конструкции

- промышленных зданий. / Н. П. Мельников. – М. : Стройиздат, 1975, С. 3 – 24.
88. Притыкин А. И. Разработка методов расчета и конструктивных решений балок с однорядной и двухрядной перфорацией стенки : автореф. дис. На здобуття наук. ступеня док. техн. наук : спец. 05.23.01 „Строительные конструкции, здания и сооружения” / А. И. Притыкин. – Калининград, 2011. – 44 с.
  89. Прогрессивные строительные конструкции для сельского строительства, науч.-техн. конф. (Тез. докл.). – Ровно, 1990. – 56 с.
  90. Прогини і переміщення : ДСТУ Б В.1.2-3:2006. – Офіц. вид. – К. : Сталь, 2006. – 12 с. (Нормативний документ Мінбуду України. Норми проектування).
  91. Рекомендации по изготовлению сквозных развитых по высоте балочных профилей для стальных конструкций. – М. : ВНИИмонтажспецстрой, 1978. – 23 с.
  92. Рекомендации по проектированию легких металлических конструкций со сквозной стенкой. – М. : ЦНИИПСК, 1972. – 20 с.
  93. Ржаницин А. Р. Теория составных стержней строительных конструкций / А. Р. Ржаницин. – М. : Стройиздат, 1958. – 192 с.
  94. Романюк В. В. Деформативность конструкции перфорированного прогона Z-образного профиля в условиях косоугольного изгиба / В. В. Романюк, В. Б. Василенко // Вестник Белорусско-Российского университета. – Могилев, Республика Беларусь. – 2015. – № 1. – С. 111–119.
  95. Романюк В. В. Дослідження напружено-деформованого стану перфорованого двотаврового прогону в ПК „Ліра” / В. В. Романюк, В. Б. Василенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Випуск 27. – Рівне, 2013. – С. 174–181.
  96. Романюк В. В. Дослідні конструкція та установка для проведення експериментальних досліджень напружено-деформованого стану

- перфорованого прогону Z-подібного профілю в умовах косого згину / В. В. Романюк, В. Б. Василенко // Зб. наук. праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава : ПНТУ, 2014. – Випуск 3 (42). – С. 102–107.
97. Романюк В. В. Експериментальна установка для дослідження стальної арки та методика проведення досліду / В. В. Романюк, В. В. Супрунук // Зб. наук. ст. Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація. – Вип. 6. – Кривий Ріг : КТУ, 2004. – С. 225–229.
98. Романюк В. В. Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану сталеві попередньо-напруженої перфорованої арки / В. В. Романюк, В. В. Супрунук // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Випуск 14. – Рівне, 2006.– С. 309–317.
99. Романюк В. В. Ефективна конструкція стальної двошарнірної арки / В. В. Романюк, В. В. Супрунук // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Випуск 9. – Рівне, 2003.– С. 288–293.
100. Романюк В. В. Карнизные узлы легких трехшарнирных рам сельскохозяйственных производственных зданий : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.01 „Строительные конструкции, здания и сооружения” / В. В. Романюк.– К., 1990. – 18 с.
101. Романюк В. В. Методика проведення експериментальних досліджень перфорованих прогонів в умовах косого згину / В. В. Романюк, В. Б. Василенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Випуск 25. – Рівне, 2013. –С. 405–411.
102. Романюк В. В. Напружений стан перфорованих елементів, що працюють в умовах косого згину / В. В. Романюк, В. Б. Василенко //



- Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Випуск 29. – Рівне, 2014. – С. 322–333.
103. Романюк В. В. Перевірка міцності перфорованих згинальних та стиснуто-згинальних сталевих елементів за деформованою та недеформованою схемами / В. В. Романюк, В. В. Супрунук // Вісник НУВГП. – Вип. 3 (27). – Рівне, 2004. – С. 186–191.
104. Романюк В. В. Покриття виробничих і громадських будівель з використанням металевих конструкцій / В. В. Романюк, В. Б. Василенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Випуск 24. – Рівне, 2012. – С. 385–390.
105. Романюк В. В. Розрахунок перфорованих елементів в програмному комплексі „Ліра” / В. В. Романюк, В. Б. Василенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Випуск 25. – Рівне, 2013. – С. 412–417.
106. Романюк В. В. Удосконалена конструкція сталевих арки / В. В. Романюк, В. В. Супрунук // Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції „Наука і освіта 2005”. – Том 55. Будівництво та архітектура. – Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2005. – С. 17–20.
107. Ромашко В. М. Обстеження та випробування споруд. Практикум: Посібник для студ. спец. 7.092101 „Промислове та цивільне будівництво” / В. М. Ромашко. – Рівне : Вид-во Рівненського держ. техн. ун-ту, 1999. – 116 с.
108. Руководство по применению двутавров и тавров с параллельными гранями полок (широкополочных двутавров и тавров) в строительных конструкциях. – М. : ЦНИИПСК, 1977. – 50 с.
109. Сахновский М. М. Легкие конструкции стальных каркасов зданий и сооружений / М. М. Сахновский. – К. : Будівельник, 1984. – 160 с.

110. Сборник статей. Металлические и пластмассовые конструкции. Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. М. М. Жербина. – К. : Будівельник, КИСИ, 1998. – 136 с. с черт.
111. Серия 1.462-11 : Стальные прогоны производственных зданий. – Вып. 1 Сквозные прогоны пролетом 12 м. – М. :ЦНИИПСК, 1976. – 15 с.
112. Скляднєв А. І. Конструктивні форми і методи розрахунок балок з перфорованою стінкою : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. : спец. 05.23.01 „Строительные конструкции, здания и сооружения” / А. І. Скляднєв. – М., 1978. – 19 с.
113. Сталеві конструкції : ДБН В.2.6 – 163: 2010. – Офіц. вид. – К. : ДП „Укрархбудінформ”, 2011. – 202 с. (Нормативний документ Мінрегіонбуду України. Норми проектування, виготовлення і монтажу).
114. Стальные конструкции производственных зданий из широкополочных двутавров и тавров / [Я. А. Каплун, В. М. Бахмутский, А. Е. Ланук и др.] // Промышленное строительство. – 1976. – № 2. – С. 36–38.
115. Стальные конструкции : СНиП II–23–81\*. – М. : ЦИТП / Госстроя СССР, 1991. – 96 с.
116. Строительная климатология и геофизика : СНиП 2.01.01-82. – М. : Стройиздат, 1983. – 136 с.
117. Солодарь І. Б. Розвитіє сталіє балки із прокатних профілів // Бюлетень строительной техники. – 1950. – № 12. – С. 19–21.
118. Стрелецкий Н. С. Новые идеи и возможности в металлических промышленных конструкциях / Н. С. Стрелецкий. – М.–Л. : Госстройиздат, 1934. – 94 с., ил.
119. Стрелецкий Н. С. Проектирование и изготовление экономичных металлических конструкций / Н. С. Стрелецкий, Д. Н. Стрелецкий. – М. : Стройиздат, 1964. – 369 с.

120. Супрунюк В. В. Алгоритм розрахунку сталевих арки // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне, 2005. – Випуск 12. – с. 325-329.
121. Супрунюк В. В. Стальні попередньо напружені перфоровані арки : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. : спец. 05.23.01 „Будівельні конструкції, будівлі та споруди” / В. В. Супрунюк. – Рівне, 2007. – 20 с.
122. Сучасний стан проблеми оптимального проектування сталевих конструкцій // Металеві конструкції. Т. 1 / В. О. Пермяков. – К., 1998. – С. 15–18.
123. Тришевский И. С. Сборно-разборные конструкции из перфорированных профилей / И. С. Тришевский, В. В. Клепанда, Б. В. Зайцев, С. В. Колоколов // Промышленное строительство. – № 10. – 1975. – С. 15–16.
124. Тришевский И. С. Металлические конструкции: Справочное пособие / И. С. Тришевский, В. В. Клепанда. – К. : Будівельник, 1978. – 112 с., ил.
125. Украинский зональный каталог индустриальных изделий и конструкций: Для сельскохозяйственного строительства. – К. : Будівельник, 1980. – 56 с.
126. Хромец Ю. Н. Промышленные здания из легких конструкций / Ю. Н. Хромец. – М. : Стройиздат, 1978. – 176 с.
127. Хромец Ю. Н. Пути снижения материалоемкости промышленного строительства / Ю. Н. Хромец, В. М. Спиридонов // Промышленное строительство. – № 6. – 1974. – С. 20–23.
128. Чернашкин В. Г. Изготовление облегченных металлических конструкций из развитых двутавров / [В. Г. Чернашки, Ю. А. Чернов, Ю. Н. Симаков та ін.] // Промышленное строительство. – № 10. – 1974. – С. 19–21.

129. Чернолоз В. С. Натурные испытания стальной подкрановой балки из развитых двутавров с переменной высотой стенки пролетом 6 м. // Тезисы докл. VI Всесоюзной конф. „Экспериментальные исследования инженерных сооружений”. – Новополоцк : НПИ, 1986. – С. 54–61.
130. Чернолоз В. С. Некоторые принципы конструирования и расчета стальных подкрановых балок из развитых двутавров с переменной по длине высотой стенки // Гидромелиорация и гидротехническое строительство. – Львов, 1988. – Вып. 16. – С. 127–128.
131. Чернолоз В. С. Подкрановые балки из развитых двутавров с переменной по длине высотой стенки : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. : спец. 05.23.01 „Строительные конструкции, здания и сооружения” / В. С. Чернолоз. – К., 1987. – 19 с.
132. Чернолоз В. С. Стальные подкрановые балки из развитых двутавров с переменной высотой стенки. // Тез. докл. III Украинской респ. Научно-техн. конф. „Перспективы развития и пути повышения эффективности применения легких и особо легких конструкций”. – Киев : НТО Стройиндустрии УССР, 1984. – С. 43–44.
133. Шимановский М. М. О путях снижения металлоемкости и перспективах совершенствования легких металлических конструкций / М. М. Шимановский // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1985. – № 10. – С. 4–11.
134. Шимановский В. Н. Сварные строительные конструкции. Типы конструкций / [В. Н. Шимановский, Э. Ф. Гарф, В. А. Пермяков и др.]. – К. : ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 1997. – 680 с.
135. Экспериментальные исследования стальных балок со стенками большой гибкости, работающие на чистый изгиб // Легкие металлические конструкции промышленных зданий. / В. В. Каленов. – М. : Стройиздат, 1975. – С. 121–140.

136. Эффективные стальные каркасы массовых однопролетных производственных зданий // Совершенствование сварных металлических конструкций. / М. М. Жербин, С. И. Билык, А. В. Тихоновский. – К. : Наукова думка, 1992. – С. 94–104.
137. Югов А. М. Проектирование зданий из легких металлических конструкций с учетом внутреннего комфорта / [ А. М. Югов, С. В. Колесниченко, Д. В. Левченко та ін.] // Донбаська державна академія будівництва і архітектури. Вісник „Будівельні конструкції, будівлі та споруди,, – Вип. 2 (39), т. 2. – Макіївка, 2003. – С. 151–153.
138. Adeli H. Integrated genetic algorithm for optimization of space structures / H. Adeli, Chang Nai-Tsang // Journal of aerospace engineering, ASCE. – v. 6(4), 1993. – p. 315–327.
139. Allfillich M. D. An investigation of welded open web expanded beams / M. D. Allfillich, B. R. Gooke, A. A. Torpac // Welding journal. – 1957. – №2. – p. 77–88.
140. American Institute of Steel Construction. Manual of steel construction: Allowable stress design / American Institute of Steel Construction. – Chicago, Illinois 60601 : AISC, – 1989. – p. 735.
141. Belegundu A. O. A study of mathematical programming methods for structural optimization. Part I: Theory / A. O. Belegundu, J. S. Arora // International journal for numerical method in engineering. – 1984. – v. 20. – p. 803–816.
142. Blodgett O. W. Pressing of Welded Structures // Cleveland. – 1980. – p. 4.7.1–4.7.24.
143. Dobbs M. W. Application of optimality criteria to automated structural design / M. W. Dobbs, R. B. Nelson // AIAA Journal. – Oct. 1976. – v.14(10). – p. 1436–1443.
144. Faltus F. Contribution an calcul des poutres a ams evidees // Acier, Stahl, steel. – 1966. – № 5. – s. 1761–1783.

145. Fleury C. Structural weight optimization by dual methods of convex programming / C. Fleury // International journal for numerical methods in engineering. – 1979. – vol. 14. – p. 203–228.
146. Gibson I. S. An investigation of the stress and deflection in pastellated beams / I. S. Gibson, B. S. Jenkins // Structural engineer. – 1957. – № 12. – p. 467–479.
147. Halleux P. Analyse limite des pouters metalliques a ame evidel // Acier, stahl, steel. – 1967. – № 3. – s. 135–146.
148. Hening C. Der Wabenträger. // Bauplanung – Bautechnik. – 1967. – № 4. – s. 437–440.
149. Honeycomb girders and method for making same / F. Litzka. The patent 3.283.464 (USA) was published in “Official Gazette United States patent office”, 1966, № 2.
150. Hosain M. U. Deflection analysis of expanded open-web steel beams / M. U. Hosain, W. K. Chang, V. V. Neis // Computers and Structural. – 1974. – vol. № 2. – p. 327–336.
151. Hrabok M. M. Castellated beams deflections using substructuring / M. M. Hrabok, M. U. Hosain // Journal of the Structural Division. Proceedings of the ASCE. – 1977. – vol. 103. – № 1. – p. 265–268.
152. Lambert R. Fabrication rationnele de poutres ajourees en Espagne. // Acier, stahl, steel. – 1961. – № 11. – p. 497–498.
153. Lind Niels C. Utilization of cold-formed steel / C. Lind Niels, K. Schroff Dilip // Journal of the Structural Division. ASCE. – 1975. – vol. 101. – № 1. – p. 67–78.
154. Litzka F. La production automatique de poutres a ame evidee de toute types et de toute dimrnsions. // Acier, stahl, steel. – 1960. – № 11. – s. 499–503.
155. Making girder, angular bending, welding by fusion. // Litzka F. –The Patent 936.834 was published in “Patent for inventions”, group 22.

156. Permyakov V. A. General purpose code for steel structures optimal design / V. A. Permyakov, A. M. Remennikov // Computers and structures. – 1992. – vol. 43, № 6. – p. 1155.
157. Rannila. Легкие стальные прогоны. Калью Лооритс. – Ou Hansaprint, 1999. – p. 43.
158. Sander G. Mixed method in structural optimization / G. Sander, C. A. Fleury // International journal for numerical methods in engineering. – 1978. – vol. 13. – p. 385–404.
159. Vardenier J. Design Rules for Predominantly Statically loaded Welded Joints in Circular Hollow Sections. Doc. XV-436-79.1979.
160. Vierendeel A. Theorie general a des pontres Vierendeel / A. Vierendeel. – Paris, 1900.
161. Vierendeel A. Zongerons en trellis et longerons a arcades / A. Vierendeel. – Paris, 1900.
162. Vipperla B. Venkayya Structural optimization: a review and some recommendations // International journal for numerical methods in engineering. – 1978. – vol. 13. – p. 203–228.
163. Watson J. Composite actions without shear connectors / J. Watson, R. Oneil, R. Bearnoff // Engineering journal : AISC. – 1974. – vol. II, №2. – p. 29–34.

### **ДОДАТОК А.**

**Результати числових досліджень перфорованих елементів у  
програмному комплексі „Ліра”**



Таблиця А.1 – Нормальні напруження в характерних перерізах вихідного профілю і перфорованого прогону

Кут нахилу	Навантаження, кН	Ділянка	Точка	Напруження, МПа		Різниця, %
				вихідний	перфорований	
1	2	3	4	5	6	7
0	8,8	1	1	76,9	53,6	30
			2	-	63	-
			3	-	61,5	-
			4	77,3	54,2	30
			5	69,3	55,3	20
			6	69,1	55,4	20
		2	1	130,6	99,7	24
			2	-	59,4	-
			3	-	58,6	-
			4	131	100,4	23
			5	126,9	101,4	20
			6	127	101,7	20
		3	1	138,5	109,6	21
			2	-	43,3	-
			3	-	43,3	-
			4	138,4	109,5	21
			5	138,5	110,7	20
			6	138,4	110,5	20
5	5,6	1	1	52,8	35,9	32
			2	-	42,4	-
			3	-	41	-
			4	55	36,2	34
			5	47,5	37,1	22
			6	48,5	37,3	23
		2	1	89,5	66,9	25
			2	-	40,6	-
			3	-	39,7	-
			4	92,4	67,4	27
			5	87	68	22
			6	89,7	68,2	24
		3	1	94,9	73,7	22
			2	-	26,8	-
			3	-	26,9	-
			4	97,5	73,8	24
			5	94,9	74,4	22
			6	97,5	74,4	24

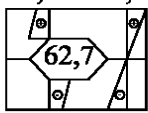
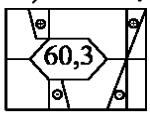
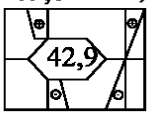
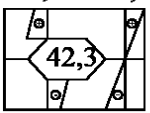
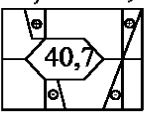
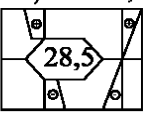
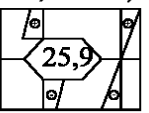
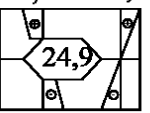
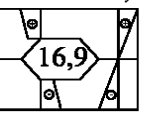
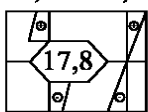
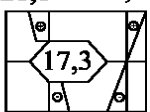
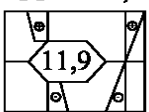
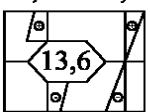
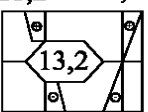
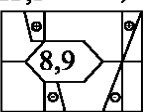
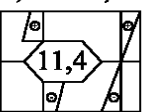
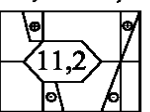
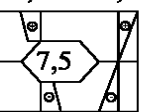
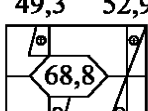
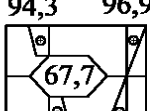
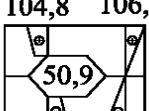
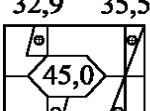
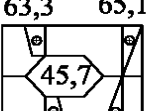
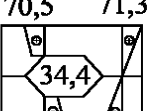
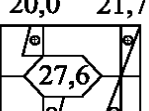
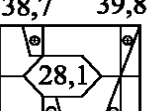
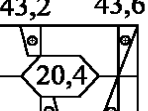
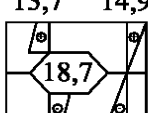
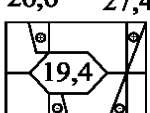
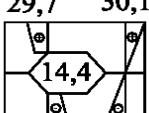
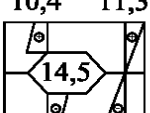
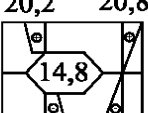
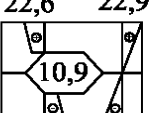
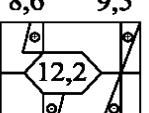
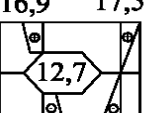
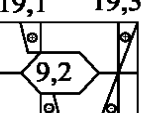
продовження табл. А.1

1	2	3	4	5	6	7
10	3,3	1	1	32,8	21,8	34
			2	-	25,9	-
			3	-	24,8	-
			4	35,4	21,9	38
			5	29,3	22,7	23
			6	30,6	23	25
		2	1	55,6	40,8	27
			2		24,9	-
			3		24,4	-
			4	59,1	41,1	30
			5	54,1	41,5	23
			6	57,6	41,5	28
		3	1	59	45	24
			2	-	17,5	-
			3	-	17,6	-
			4	62,3	45,1	28
			5	59,1	45,4	23
			6	62,4	45,5	27
15	2,3	1	1	22,9	14,9	35
			2	-	18	-
			3	-	17	-
			4	25,6	14,8	42
			5	20,4	15,6	24
			6	21,8	15,8	28
		2	1	38,9	28,1	28
			2	-	17,3	-
			3	-	16,9	-
			4	42,5	28,3	33
			5	37,8	28,5	25
			6	41,5	28,5	31
		3	1	41,3	31	25
			2	-	11,9	-
			3	-	12,2	-
			4	44,9	31,1	31
			5	41,3	31,3	24
			6	45	31,4	30
20	1,8	1	1	17,5	11,2	36
			2	-	13,5	-
			3	-	12,7	-
			4	20,4	11	46

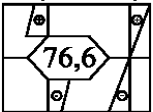
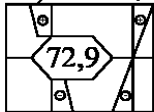
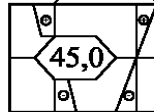
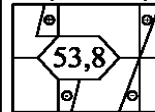
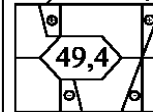
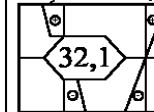
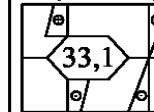
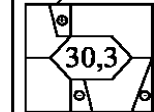
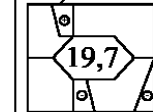
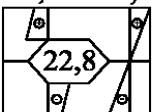
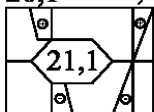
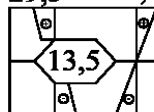
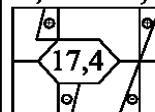
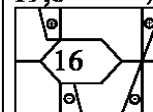
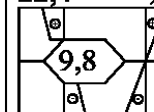
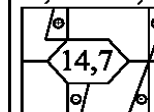
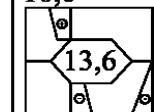
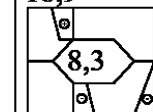
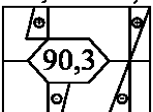
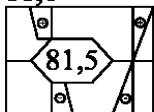
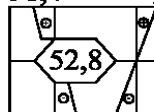
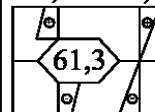
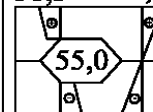
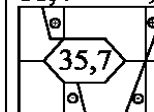
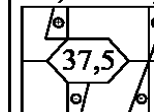
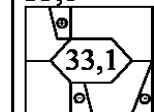
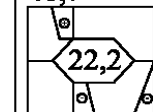
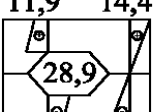
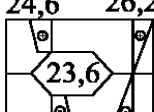
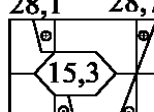
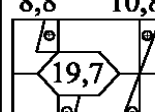
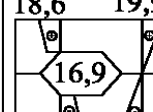
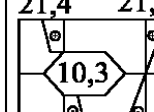
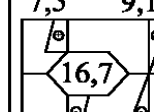
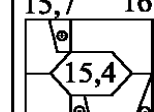
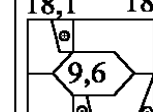
продовження табл. А.1

1	2	3	4	5	6	7
20	1,8	1	5	15,5	11,8	24
			6	17	12	29
		2	1	29,8	21,2	29
			2	-	13,2	-
			3	-	13	-
			4	33,7	21,5	36
			5	29	21,6	26
			6	32,9	21,6	34
		3	1	31,8	23,5	26
			2	-	9	-
			3	-	9,2	-
			4	35,6	23,7	33
			5	31,8	23,7	25
			6	35,7	23,8	33
25	1,5	1	1	14,7	9,3	37
			2	-	11,3	-
			3	-	10,7	-
			4	17,9	9,1	49
			5	12,9	9,9	23
			6	14,6	10,2	30
		2	1	25,4	17,8	30
			2	-	11,2	-
			3	-	11	-
			4	29,7	18,1	39
			5	24,7	18,1	27
			6	29	18,1	38
		3	1	27,1	19,8	27
			2	-	7,5	-
			3	-	7,8	-
			4	31,4	20	36
			5	27,1	20	26
			6	31,5	20	37

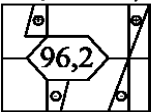
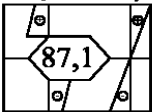
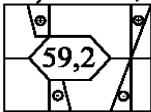
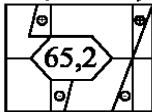
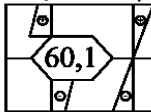
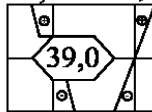
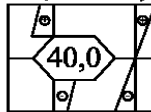
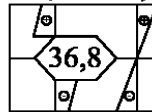
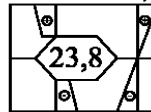
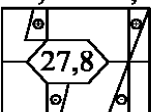
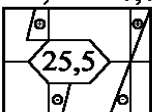
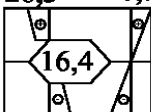
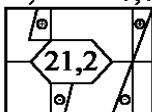
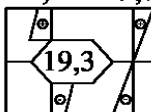
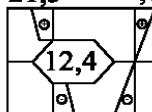
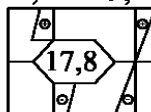
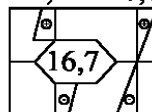
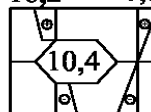
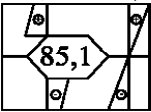
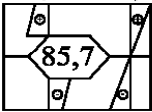
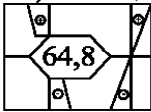
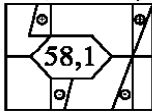
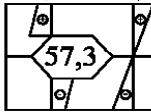
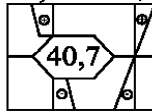
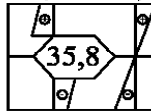
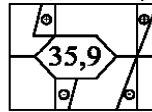
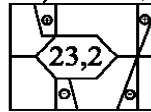
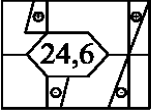
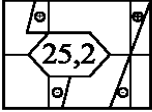
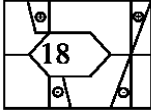
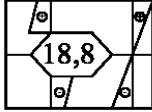
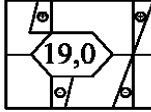
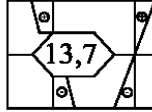
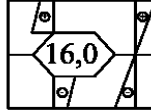
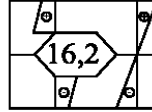
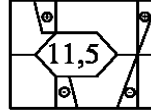
Таблиця А.2 – Нормальні напруження (МПа) в характерних перерізах перфорованого Z-подібного профілю залежно від коефіцієнта розвитку висоти перерізу елемента

К-нт розвитку перерізу	Кут нахилу								
	0			5			10		
	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3
1,2	53,8 55,2 	99,8 101,2 	109,6 110,7 	36,1 37,1 	66,9 68,2 	73,6 74,4 	21,8 22,9 	40,8 41,5 	45 45,4 
	15			20			25		
	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3
	14,9 15,8 	28,1 28,5 	31 31,3 	11,2 11,8 	21,2 21,6 	23,5 23,7 	9,3 9,9 	17,9 18,1 	19,8 20,0 
	0			5			10		
	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3
	49,3 52,9 	94,3 96,9 	104,8 106,0 	32,9 35,5 	63,3 65,1 	70,5 71,3 	20,0 21,7 	38,7 39,8 	43,2 43,6 
1,25	15			20			25		
	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3
	13,7 14,9 	26,6 27,4 	29,7 30,1 	10,4 11,3 	20,2 20,8 	22,6 22,9 	8,6 9,5 	16,9 17,5 	19,1 19,3 

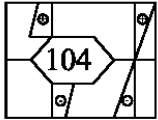
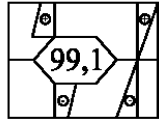
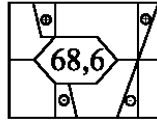
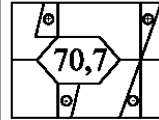
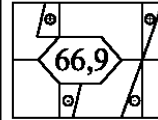
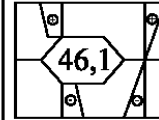
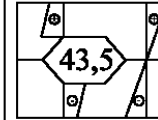
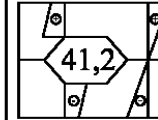
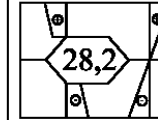
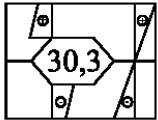
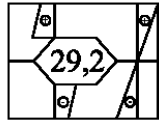
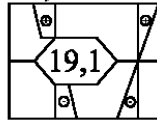
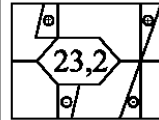
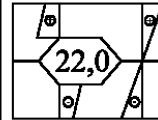
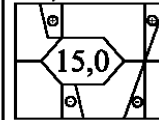
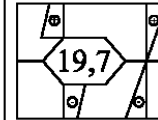
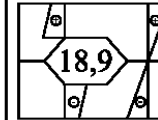
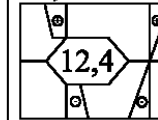
продовження табл. А.2

К-нт розвитку перерізу	Кут нахилу								
	0			5			10		
	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3
1,3	46,9 52,5 	92,5 96,2 	103,8 105,3 	31,5 35,4 	62,1 64,8 	69,8 70,8 	19,1 21,7 	37,9 39,7 	42,7 43,4 
	15			20			25		
	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3
	13,1 14,9 	26,1 27,3 	29,5 29,9 	9,8 11,3 	19,8 20,6 	22,4 22,7 	8,2 9,5 	16,6 17,4 	18,9 19,2 
	0			5			10		
	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3
1,35	41,9 50,1 	86,6 92 	98,4 100,5 	28,1 33,7 	58,3 61,9 	66,4 67,7 	12,3 20,8 	35,6 37,8 	40,7 41,5 
	15			20			25		
	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3
	11,9 14,4 	24,6 26,2 	28,1 28,7 	8,8 10,8 	18,6 19,9 	21,4 21,8 	7,5 9,1 	15,7 16,8 	18,1 18,5 

продовження табл. А.2

К-нт розвитку перерізу	Кут нахилу								
	0			5			10		
	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3
1,4	40,8 49,9 	86,1 91,6 	99,2 99,9 	27,3 33,7 	58,0 61,7 	66,9 67,3 	16,6 20,6 	35,4 37,7 	41 41,2 
	15			20			25		
	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3
	11,3 14,1 	24,4 26,0 	28,3 28,5 	8,5 10,8 	18,5 19,7 	21,5 21,7 	7,2 9,1 	15,6 16,6 	18,2 18,3 
	0			5			10		
1,45	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3
	36,4 46,6 	79,6 85,3 	92,4 93,1 	24,7 31,3 	53,5 57,6 	62,4 62,9 	15,1 19,3 	32,9 35,2 	38,3 38,6 
	15			20			25		
	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3
	10,2 13,3 	22,7 24,4 	26,5 26,7 	7,7 10,2 	17,2 18,6 	20,2 20,4 	6,5 8,5 	15,6 15,7 	17,2 17,3 
	0			5			10		

продовження табл. А.2

К-нт розвитку перерізу	Кут нахилу								
	0			5			10		
	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3
1,5	31,4 46,3 	76,0 84,5 	91,1 92,4 	21,0 31,5 	51,3 57,3 	61,5 62,4 	12,6 19,2 	31,4 35,0 	37,8 38,3 
	15			20			25		
	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3
	8,8 13,2 	21,7 24,2 	26,2 26,5 	6,6 10,2 	16,5 18,3 	20,0 20,2 	5,5 8,6 	13,9 15,6 	16,9 17,2 

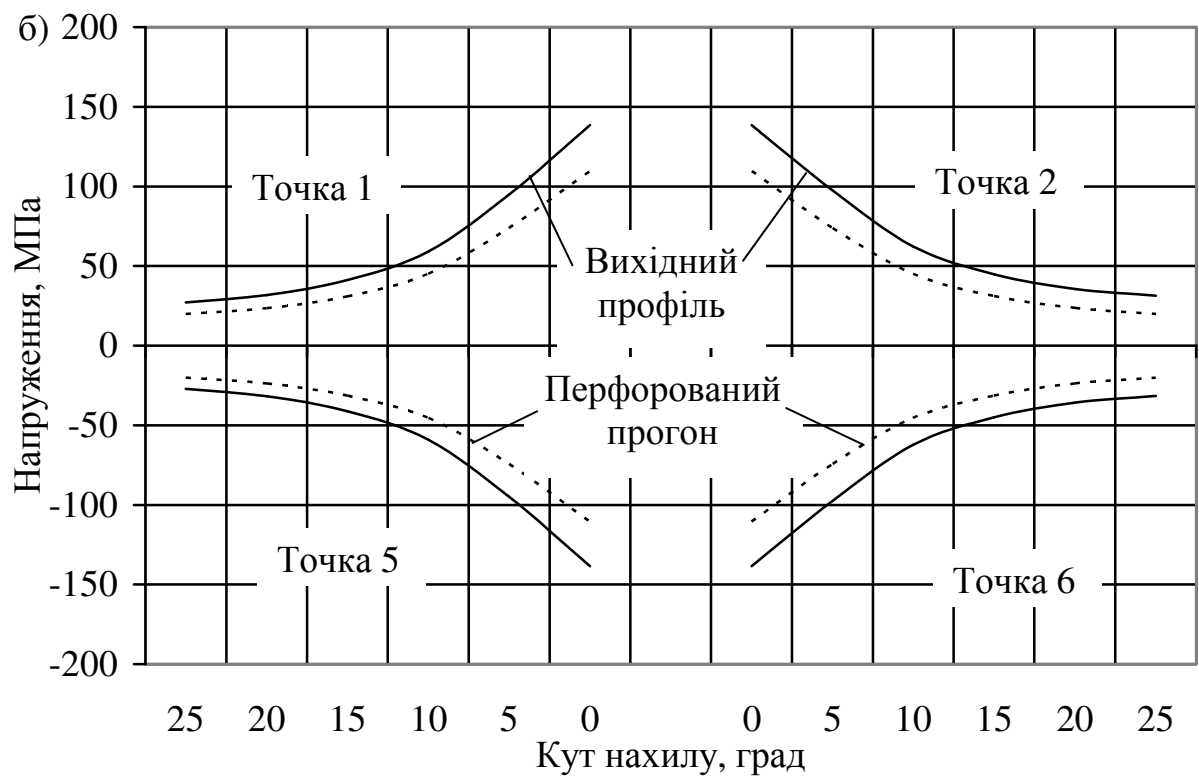
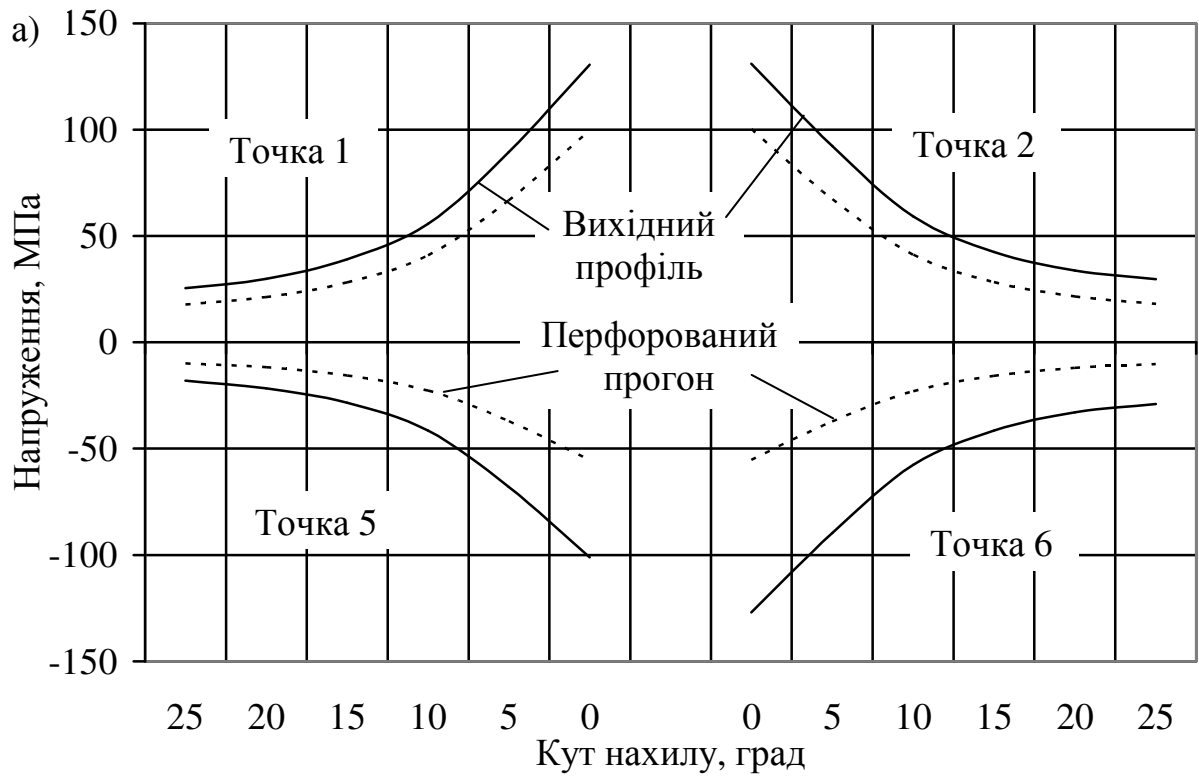


Рисунок А.1 – Напруження у розрахункових точках залежно від кута нахилу конструкції перфорованого прогону і вихідного профілю у характерних перерізах: а – ділянка 2; б – ділянка 3



Таблиця А.3 – Нормальні напруження (МПа) в характерних точках перерізу перфорованого Z-подібного профілю

Коефіцієнт розвитку перерізу	Точка	Нормальні напруження, якщо кут нахилу конструкції, град																	
		0			5			10			15			20			25		
		Ділянка			Ділянка			Ділянка			Ділянка			Ділянка			Ділянка		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1,2	1,4	54	100	110	36	67	74	22	41	45	15	28	31	11	21	24	9	18	20
	2,3	63	60	43	42	41	29	26	25	17	17	17	12	14	13	9	11	11	8
	5,6	55	101	111	37	68	74	23	42	45	16	29	31	12	22	24	10	18	20
1,25	1,4	49	94	105	33	63	71	20	39	43	14	27	30	10	20	23	9	17	19
	2,3	69	68	51	45	46	34	28	28	20	19	19	14	15	15	11	12	13	9
	5,6	53	97	106	36	65	71	22	40	44	15	27	30	11	21	23	10	18	19
1,3	1,4	47	93	104	32	62	70	19	38	43	13	26	30	10	20	22	8	17	19
	2,3	77	73	45	54	49	32	33	30	20	23	21	14	17	16	10	15	14	8
	5,6	53	96	105	35	65	71	22	40	43	15	27	30	11	21	23	10	17	19
1,35	1,4	42	87	98	28	58	66	12	36	41	12	25	28	9	19	21	8	16	18
	2,3	90	82	53	61	55	36	38	33	22	29	24	15	20	17	10	17	15	10
	5,6	50	92	101	34	62	68	21	38	42	14	26	29	11	20	22	9	17	19
1,4	1,4	41	86	99	27	58	67	17	35	41	11	24	28	9	19	22	7	16	18
	2,3	96	87	59	65	60	39	40	37	24	28	26	16	21	19	12	18	17	10
	5,6	50	92	100	34	62	67	21	38	41	14	26	29	11	20	22	9	17	18
1,45	1,4	36	80	92	25	54	62	15	33	38	10	23	27	8	17	20	7	16	17
	2,3	85	86	65	58	57	41	36	36	23	25	25	18	19	19	14	16	16	12
	5,6	47	85	93	31	58	63	19	35	39	13	24	27	10	19	20	9	16	17
1,5	1,4	31	76	91	21	51	62	13	31	38	9	22	26	7	17	20	6	14	17
	2,3	104	99	69	71	67	46	44	41	28	30	29	19	23	22	15	20	19	12
	5,6	46	85	92	32	57	62	19	35	38	13	24	27	10	18	20	9	16	17

Таблиця А.4 – Нормальні напруження (МПа) в перфорованих елементах з різною конфігурацією перерізу

Вихідний профіль	Точка	Нормальні напруження, якщо кут нахилу конструкції, град																	
		0			5			10			15			20			25		
		Ділянка			Ділянка			Ділянка			Ділянка			Ділянка			Ділянка		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	1	81	149	164	59	109	120	38	71	78	27	50	55	20	38	42	16	31	34
	2	94	90	66	69	69	47	44	44	31	31	31	22	24	24	17	19	19	13
	5	82	151	165	61	111	121	39	72	79	28	50	55	21	39	43	17	31	34
	1	81	150	164	42	77	84	23	43	47	16	30	33	13	24	26	10	19	21
	2	93	91	67	48	46	34	26	25	18	18	17	12	14	13	9	11	10	7
	5	83	151	165	43	78	85	24	44	48	17	31	34	13	24	26	11	19	21
	1	89	157	169	46	81	87	26	46	50	18	32	35	14	25	27	12	21	23
	2	101	97	69	52	50	34	30	29	20	21	20	14	16	15	10	13	13	9
	5	85	155	169	43	80	87	25	46	50	17	32	35	13	24	27	11	21	23

Таблиця А.5 – Геометричні характеристики а несуча здатність перфорованих прогонів залежно від коефіцієнта розвитку вихідного профілю

Вихідний профіль	Коефіцієнт розвитку висоти перерізу	Геометричні характеристики профілю				Кут нахилу конструкції	Несуча здатність без урахування закріплення конструкції за граничними станами		Несуча здатність з урахуванням закріплення конструкції за граничними станами		Крок закріплення, м
		α	h, мм	I <sub>z</sub> , min, см <sup>4</sup>	W <sub>z</sub> , min, см <sup>3</sup>		Граничні стани				
							1	2	1	2	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
18	1	-	180	1190	111	0	2,5	0,9	7,8	5,2	1,2
						5	3	1,2	7,6	5,1	
						10	3,9	1,8	7,5	5	
						15	5,5	3,6	7,4	4,9	
						20	6	4,2	7,4	4,9	
						25	4,1	2	7,5	5	
	1,2	15	216	1734	139	0	3,1	1,1	9,6	7,5	1,1
						5	4	1,6	9,4	7,3	
						10	5,6	3	9,3	7,2	
						15	9,3	7,2	9,3	7,2	
						20	5,6	3	9,4	7,3	
						25	4	1,6	9,3	7,2	
	1,3	14	234	2031	153	0	3,4	1,2	10,5	8,7	1,1
						5	4,4	1,8	10,3	8,5	
						10	6,4	3,8	10,2	8,5	
						15	8,9	7,5	10,2	8,4	
						20	5,4	2,7	10,3	8,5	
						25	3,9	1,5	10,4	8,6	
	1,4	13	252	2332	169	0	3,7	1,3	11,6	9,9	1,1
						5	4,9	2,1	11,4	9,8	
						10	7,6	4,9	11,3	9,7	
						15	8,5	6,4	11,3	9,7	
						20	5,3	2,3	11,4	9,8	
						25	3,8	1,4	11,5	9,9	
	1,5	12	270	2626	179	0	3,8	1,4	12,2	11,1	1,1
						5	5,2	2,3	12	11	

продовження табл. А.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
18	1,5	12	270	2626	179	10	8,7	6,6	11,9	10,9	1,1
						15	7,7	4,9	12	10,9	
						20	5,2	2,3	12	11	
						25	3,8	1,4	12,2	11,1	
22	1	-	220	2292	176	0	3,9	1,5	12,3	10	1,4
						5	4,8	2,1	12	9,8	
						10	6,1	3,3	11,8	9,6	
						15	8,7	6,6	11,7	9,5	
						20	9,5	7,8	11,7	9,5	
						25	6,5	3,7	11,8	9,6	
	1,2	14	264	3345	226	0	4,9	2,1	15,5	14,3	1,3
						5	6,5	3,3	15,3	14,1	
						10	9,4	6,6	15,1	13,9	
						15	13,1	12,6	15,1	13,9	
						20	8	4,7	15,2	14	
						25	5,8	2,7	15,3	14,1	
	1,3	13	286	4007	254	0	5,4	2,3	17,4	17,1	1,1
						5	7,3	3,7	17,1	16,8	
						10	11,3	8,7	17	16,7	
						15	12,7	11,2	16,9	16,6	
						20	7,9	4,2	17,1	16,8	
						25	5,7	2,5	17,3	17	
	1,4	13	308	4217	251	0	5,3	2,3	17,2	18	1,1
						5	7,1	3,6	16,9	17,7	
						10	11,1	8,5	16,8	17,5	
						15	12,5	11,2	16,7	17,5	
						20	7,7	4,1	16,9	17,6	
						25	5,5	2,4	17,1	17,9	
	1,5	11	330	5069	285	0	6,1	2,7	19,4	21,4	1,1
						5	8,8	4,8	19,1	21,2	
						10	15,9	17,1	19	21	
						15	10,7	7	19	21,1	
						20	6,9	3,2	19,2	21,3	
						25	5,1	2,1	19,6	21,7	
30	1	-	300	6161	362	0	8	4,2	25	26,5	1,7
						5	10,2	6,1	24,5	26	
						10	14,3	11,3	24,2	25,7	
						15	24,1	25,6	24,1	25,6	
						20	14,3	11,3	24,2	25,7	
						25	14,3	11,3	24,2	25,7	

продовження табл. А.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
30	1,2	12	360	9082	461	0	10,2	5,6	31,4	38,5	1,6
						5	14,1	9,3	31	38	
						10	22,9	25,1	30,8	37,7	
						15	20,3	19,3	30,8	37,8	
						20	13,1	8,2	31	38,1	
						25	6,7	5,2	31,5	38,7	
	1,3	11	390	10666	508	0	11,1	6,1	34,5	45,1	1,5
						5	15,9	11	34,1	44,5	
						10	28,5	37,1	33,9	44,3	
						15	19,3	15,9	33,9	44,4	
						20	12,6	7,5	34,3	44,8	
						25	9,5	4,9	34,9	45,6	
	1,4	10	420	12251	547	0	12	6,7	37	51,6	1,5
						5	17,9	13	36,6	51,1	
						10	36,5	50,9	36,5	50,9	
						15	17,9	13	36,6	51,1	
						20	36,5	50,9	36,5	50,9	
						25	9	4,5	37,8	52,7	
	1,5	10	450	13775	576	0	12,3	6,6	39	58,1	1,5
						5	18,6	12,8	38,5	57,4	
						10	38,4	57,2	38,4	57,2	
						15	18,6	12,8	38,5	57,4	
						20	38,4	57,2	38,4	57,2	
						25	9,3	4,4	39,8	59,2	
40	1	-	400	15769	707	0	15,6	8,3	48,8	67,8	1,8
						5	19,9	12,3	47,9	66,5	
						10	27,9	23,3	47,3	65,7	
						15	47,1	65,5	47,1	65,5	
						20	19,9	12,3	47,9	66,5	
						25	27,9	23,3	47,3	65,7	
	1,2	10	480	23496	918	0	20,2	13,2	62,1	99	1,7
						5	30,2	25,7	61,4	97,9	
						10	61,2	97,5	61,2	97,5	
						15	30,2	25,7	61,4	97,9	
						20	20,2	13,2	62,1	99	
						25	15,2	8,9	63,4	101	
	1,3	9	520	27655	1006	0	22,1	14,8	67,9	116	1,7
						5	35,1	32,1	67,2	115	
						10	54,6	87,1	67,1	115	

продовження табл. А.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
40	1,3	9	520	27655	1006	15	28,4	21,9	67,4	115	1,7
						20	19,3	12,2	68,3	117	
						25	14,7	8,4	69,7	120	
	1,4	8	560	31773	1084	0	23,9	16,5	73	133	1,7
						5	41	41,9	72,4	132	
						10	47,9	59,2	72,4	132	
						15	26,1	18,8	72,8	133	
						20	18	11,1	73,9	135	
						25	13,8	7,9	75,6	138	
	1,5	8	600	35671	1140	0	24,6	16,1	76,7	150	1,7
						5	42,3	41,4	76,1	148	
						10	49,8	59,2	76	148	
						15	26,8	18,4	76,6	149	
						20	18,4	10,8	77,7	151	
						25	14,1	7,7	79,5	155	

Таблиця А.6 – Нормальні напруження на різних ділянках перфорованих прогонів залежно від коефіцієнта розвитку висоти вихідного профілю

Вихідний профіль	Коефіцієнт розвитку	Кут нахилу	Нормальні напруження з урахуванням закріплення, МПа									Прогін , мм
			Ділянка 1			Ділянка 2			Ділянка 3			
			1	2	5	1	2	5	1	2	5	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
18	1	0	66	-	60	116	-	110	119	-	117	27
		5	61	-	55	108	-	103	111	-	110	24
		10	56	-	51	102	-	97	105	-	105	23
		15	52	-	47	95	-	92	100	-	101	22
		20	50	-	44	91	-	90	98	-	99	22
		25	48	-	43	90	-	90	98	-	100	22
	1,2	0	64	102	69	127	102	127	137	70	135	25
		5	60	97	64	118	94	119	130	67	129	23
		10	57	93	61	112	90	115	125	67	126	23
		15	55	92	59	109	87	113	124	64	126	22
		20	55	91	59	107	84	113	124	64	127	23
		25	53	89	56	103	79	110	122	60	127	23
	1,3	0	64	115	73	132	114	133	144	78	143	24
		5	61	110	69	124	107	127	138	74	138	23

продовження табл. А.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
18	1,3	10	60	108	67	120	103	124	136	76	137	22
		15	59	104	65	115	101	121	133	73	136	22
		20	59	104	64	114	98	122	134	79	139	22
		25	60	103	64	113	9	122	137	76	143	23
	1,4	0	66	167	78	143	179	144	160	138	154	27
		5	63	164	76	136	170	139	155	134	151	25
		10	62	159	74	130	163	135	151	131	150	25
		15	61	155	73	126	159	133	150	130	151	24
		20	62	154	72	125	155	134	152	131	154	25
		25	63	154	72	123	154	135	155	132	159	26
	1,5	0	62	184	80	143	192	146	161	146	156	25
		5	63	176	77	136	183	141	158	143	155	24
		10	60	175	76	130	179	138	155	141	154	23
		15	62	169	75	127	172	137	155	141	156	23
		20	63	170	76	127	167	138	158	142	161	24
		25	65	168	76	126	166	139	161	144	166	24
22	1	0	90	-	81	153	-	149	162	-	162	28
		5	84	-	76	144	-	140	153	-	153	27
		10	79	-	72	136	-	132	144	-	144	25
		15	75	-	69	130	-	59	139	-	139	25
		20	72	-	67	127	-	123	135	-	135	25
		25	70	-	66	125	-	121	134	-	134	25
	1,2	0	91	104	93	168	102	170	184	77	186	27
		5	86	100	89	160	99	162	176	71	177	25
		10	82	96	85	154	95	155	169	70	170	24
		15	80	94	83	150	95	152	165	67	167	24
		20	78	93	82	149	93	151	164	67	166	25
		25	77	93	81	148	94	150	164	65	166	26
	1,3	0	94	159	106	186	152	193	208	102	211	29
		5	90	152	100	177	143	184	198	96	201	28
		10	87	148	97	171	140	178	192	92	195	27
		15	84	144	95	167	136	174	188	87	191	27
		20	83	145	95	166	136	173	188	93	190	27
		25	82	146	94	166	142	174	189	91	192	28
	1,4	0	83	194	100	175	183	185	200	128	202	27
		5	78	186	96	166	176	176	191	125	192	26
		10	77	180	93	161	170	171	185	118	187	25
		15	73	177	91	157	167	166	181	112	182	25
		20	73	177	91	157	171	166	181	118	183	26
		25	73	178	91	157	171	167	183	114	184	27

продовження табл. А.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
22	1,5	0	72	238	106	174	230	192	207	165	211	26
		5	68	229	101	166	221	184	198	155	202	25
		10	66	225	99	161	213	180	193	148	196	24
		15	65	223	97	159	211	176	190	150	194	24
		20	64	224	96	158	212	177	191	146	194	25
		25	63	228	98	160	216	180	195	149	197	27
30	1	0	116	-	105	197	-	190	194	-	189	26
		5	108	-	98	183	-	177	187	-	185	25
		10	102	-	93	172	-	167	184	-	185	24
		15	97	-	89	163	-	159	183	-	188	23
		20	93	-	86	156	-	154	185	-	194	24
		25	90	-	83	150	-	149	187	-	200	24
	1,2	0	106	136	106	193	122	192	195	73	193	23
		5	95	127	100	181	115	182	192	72	194	22
		10	93	124	95	172	109	174	193	75	198	21
		15	89	120	91	164	104	168	195	75	206	21
		20	85	118	88	159	101	164	201	72	216	22
		25	83	113	87	156	99	163	209	68	230	23
	1,3	0	101	182	112	195	166	202	202	110	202	23
		5	94	171	104	184	155	191	201	109	204	22
		10	88	163	100	174	149	183	202	100	210	22
		15	83	159	95	166	142	177	206	110	219	22
		20	79	154	92	162	140	175	213	106	233	22
		25	78	154	90	159	138	173	224	107	250	23
	1,4	0	94	194	106	185	174	194	193	108	194	20
		5	87	186	100	174	165	184	193	113	199	19
		10	82	176	95	165	159	177	196	118	207	19
		15	77	176	92	159	152	172	202	114	218	19
		20	73	165	86	153	147	167	208	111	230	20
		25	71	171	87	153	149	170	223	121	253	21
	1,5	0	78	241	107	179	224	194	193	140	194	20
		5	70	232	100	166	206	183	193	138	200	19
		10	61	224	93	157	194	177	198	135	209	19
		15	59	215	91	150	189	172	204	145	222	19
		20	53	214	88	143	183	168	211	142	235	20
		25	51	216	85	143	184	170	228	157	259	21
40	1	0	113	-	101	192	-	185	190	-	184	19
		5	105	-	95	179	-	174	185	-	183	18
		10	99	-	90	168	-	164	183	-	186	18
		15	94	-	86	160	-	158	184	-	192	18



продовження табл. А.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
40	1	20	92	-	85	156	-	155	190	-	203	18
		25	87	-	81	149	-	149	191	-	210	18
	1,2	0	104	127	104	192	115	188	191	99	188	18
		5	98	113	98	180	113	179	189	97	190	18
		10	92	109	93	171	110	172	192	96	197	17
		15	88	103	89	165	101	167	196	95	206	18
		20	86	99	87	161	97	165	204	95	220	18
		25	84	103	87	158	100	165	216	95	236	19
		0	100	134	103	189	132	186	187	177	185	18
	1,3	5	94	123	96	176	127	177	187	115	189	17
		10	89	119	92	168	120	172	191	114	198	17
		15	82	117	88	162	119	167	197	114	209	17
		20	80	113	87	158	113	165	206	115	224	18
		25	78	110	84	155	116	164	218	116	243	19
		0	95	172	103	182	164	186	186	108	186	16
	1,4	5	87	165	96	172	159	178	187	116	193	16
		10	83	157	91	163	148	172	192	123	203	16
		15	74	158	89	158	145	168	200	112	216	16
		20	72	158	86	154	139	166	211	115	234	17
		25	69	162	84	152	135	168	225	129	256	18
		0	89	193	106	181	187	188	188	121	190	17
	1,5	5	80	186	96	170	170	181	190	136	197	16
		10	74	179	94	161	169	174	196	133	207	16
		15	72	172	87	155	160	170	204	130	222	17
		20	66	176	86	151	153	169	215	150	240	17
		25	61	178	84	150	155	170	232	128	263	19

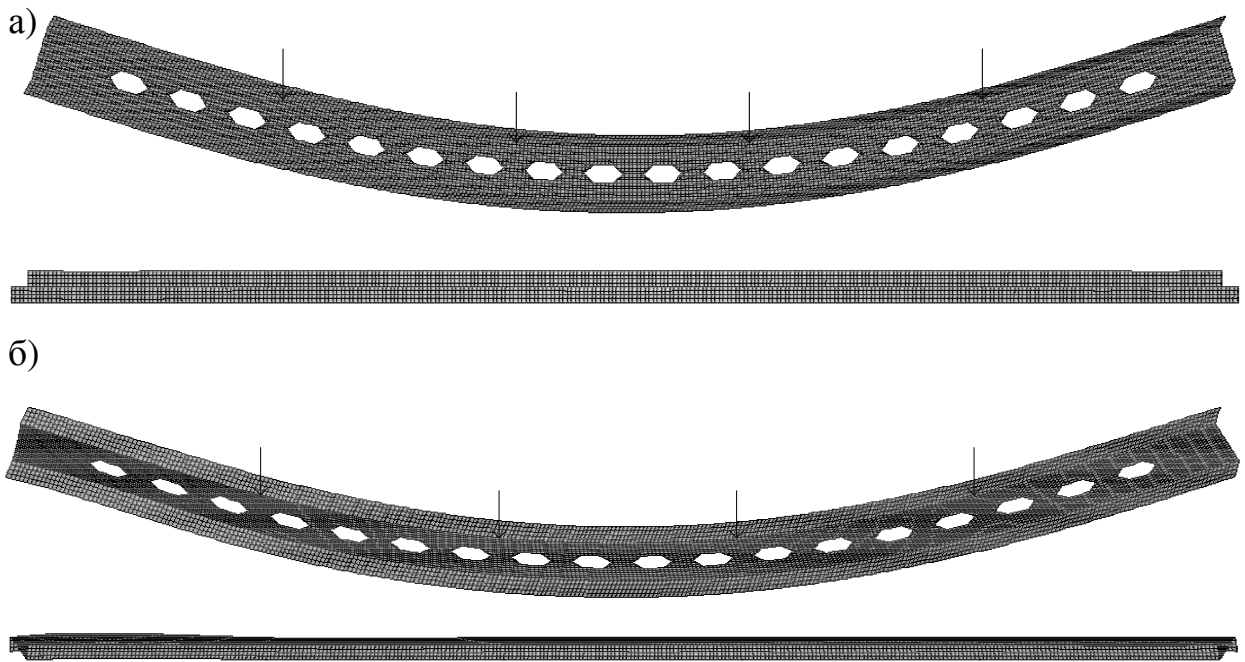


Рисунок А.2 – Схема деформування перфорованого прогону із площини конструкції, якщо крок закріплення 0,6 м

а – кут нахилу  $0^\circ$ ; б – кут нахилу  $20^\circ$

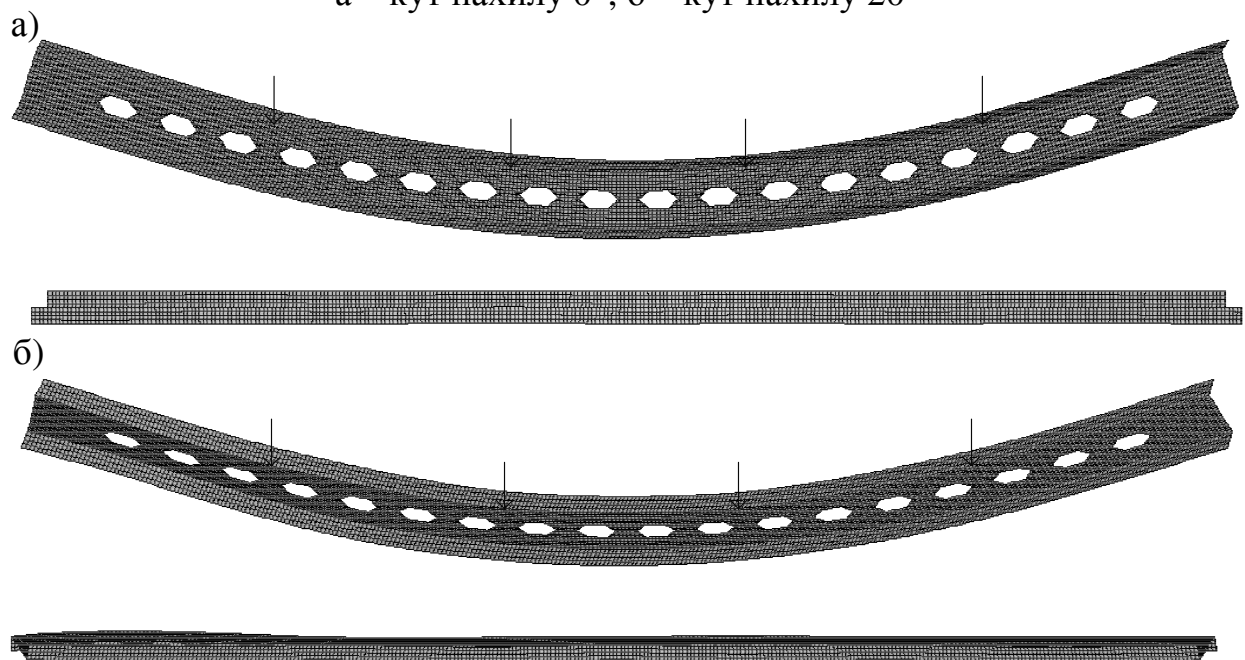


Рисунок А.3 – Схема деформування перфорованого прогону із площини конструкції, якщо крок закріплення 1,5 м

а – кут нахилу  $0^\circ$ ; б – кут нахилу  $20^\circ$

**ДОДАТОК Б.**  
**Результати експериментальних досліджень перфорованих прогонів**

Таблиця Б.1 – Нормальні напруження в перфорованих прогонах, МПа

Кут	Ділянка	Точка	ДБН	ДБН+СНиП	Ліра	Експ.
1	2	3	4	5	6	7
0	1	1	64	76	54	37
		2	21	59	63	48
		3	70	70	55	55
	2	1	100	106	100	96
		2	29	48	60	62
		3	103	103	101	120
	3	1	128	128	110	113
		2	43	43	45	68
		3	127	127	111	143
5	1	1	70	55	37	42
		2	39	42	44	52
		3	74	50	39	37
	2	1	64	78	69	78
		2	36	38	42	66
		3	66	76	70	82
	3	1	141	92	76	73
		2	80	31	27	31
		3	140	91	77	94
10	1	1	58	33	23	15
		2	39	26	26	21
		3	61	31	23	23
	2	1	47	48	42	44
		2	43	24	26	24
		3	48	47	43	43
	3	1	116	56	46	50
		2	79	19	18	19
		3	116	56	47	52
15	1	1	52	24	16	12
		2	39	19	18	15
		3	54	22	16	13
	2	1	44	33	29	24
		2	46	16	18	14
		3	44	33	30	26
	3	1	103	39	32	25
		2	77	13	13	13
		3	103	39	33	29
20	1	1	48	18	12	8
		2	38	14	14	13

продовження табл. Б.1

1	2	3	4	5	6	7
20	1	3	49	16	12	10
	2	1	46	26	22	19
		2	49	12	14	10
		3	45	25	23	22
	3	1	96	30	25	23
		2	76	10	10	12
		3	95	29	25	24
25	1	1	45	14	9	4
		2	37	11	11	11
		3	46	13	10	7
	2	1	46	20	18	14
		2	50	11	11	11
		3	46	20	18	14
	3	1	89	23	20	13
		2	74	8	8	12
		3	89	23	20	15

Таблиця Б.2 – Нормальні напруження в полиці перфорованого прогону в  
перерізі без отвору

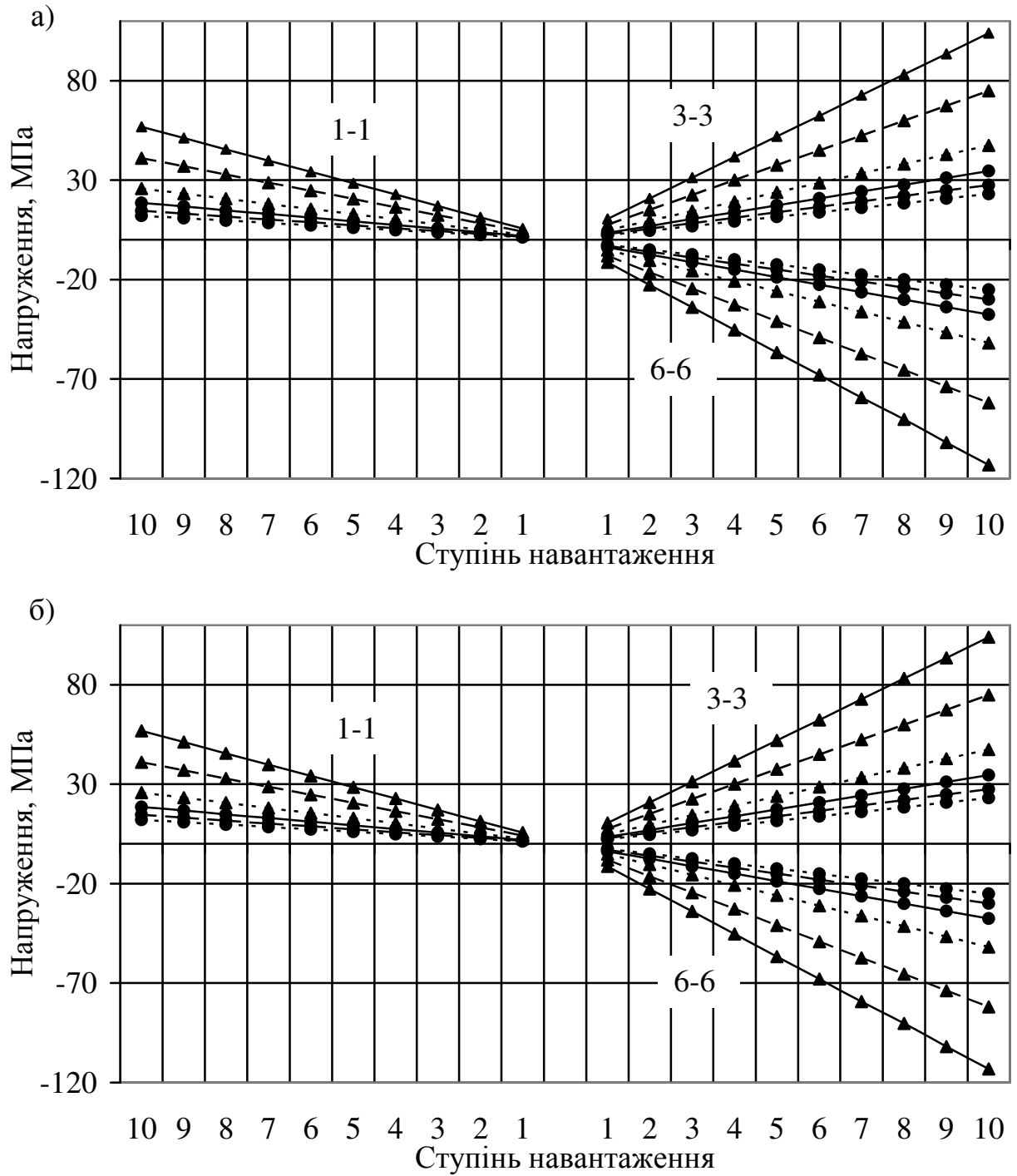
Кут нахилу	Ступінь навантаження	Нормальні напруження, МПа											
		Переріз 2-2				Переріз 4-4				Переріз 7-7			
		Край		Біля стінки		Край		Біля стінки		Край		Біля стінки	
		$\sigma_T$	$\sigma_e$	$\sigma_T$	$\sigma_e$	$\sigma_T$	$\sigma_e$	$\sigma_T$	$\sigma_e$	$\sigma_T$	$\sigma_e$	$\sigma_T$	$\sigma_e$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	1	5	5	5	5	10	11	10	9	11	15	11	12
	2	11	10	11	10	20	22	20	19	22	31	22	23
	3	17	16	16	15	31	33	30	29	34	47	33	35
	4	22	21	22	20	41	45	40	39	45	63	44	47
	5	28	27	27	25	52	56	50	49	56	79	55	59
	6	34	32	33	30	62	67	60	60	68	94	66	71
	7	39	38	38	35	72	79	70	70	79	110	77	82
	8	45	43	44	41	83	90	80	80	90	126	88	94
	9	51	49	49	46	93	101	91	90	101	142	99	106

продовження табл. Б.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	10	56	54	55	51	104	112	101	100	113	158	110	118
5	1	4	4	3	3	7	7	7	6	8	11	7	7
	2	8	8	7	7	15	14	14	13	16	22	15	15
	3	12	12	11	10	22	23	21	20	24	339	23	22
	4	16	16	15	14	30	31	28	27	32	45	30	30
	5	20	20	19	18	37	39	35	34	41	56	38	37
	6	24	24	23	21	45	47	42	41	49	67	46	45
	7	28	28	27	25	52	55	49	48	57	79	53	53
	8	32	32	31	29	60	62	56	55	65	90	61	60
	9	36	36	35	32	67	70	63	61	73	101	69	68
	10	41	40	39	36	75	78	70	68	82	113	77	75
10	1	2	2	2	2	4	4	4	4	5	6	4	4
	2	5	4	4	4	9	9	8	8	10	12	9	9
	3	7	7	7	6	14	14	12	12	15	18	14	13
	4	10	9	9	8	19	19	17	16	20	24	19	18
	5	12	12	11	10	23	24	21	20	26	30	24	22
	6	15	14	14	12	28	28	25	24	31	36	29	27
	7	18	16	16	14	33	33	29	28	36	43	34	31
	8	20	19	18	16	38	38	34	32	41	49	39	36
	9	23	21	21	19	42	43	38	36	46	55	43	40
	10	25	24	23	21	47	48	42	40	51	61	48	45
15	1	2	2	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3
	2	3	4	3	3	6	7	5	6	7	7	6	6
	3	5	7	4	4	10	10	8	9	11	10	9	10
	4	7	9	6	6	13	14	11	12	15	13	13	13
	5	9	12	8	8	17	18	14	15	18	17	16	16
	6	11	14	9	9	20	21	17	18	22	20	19	20
	7	13	17	11	11	24	25	20	21	26	24	22	23
	8	14	19	13	12	27	28	23	24	30	27	26	26
	9	16	22	14	14	31	32	26	27	33	31	29	30
	10	18	24	16	15	34	36	29	30	37	34	32	33
20	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	2	2
	2	2	2	2	2	5	4	4	4	6	6	5	5
	3	4	3	3	3	8	7	6	7	9	9	7	8
	4	5	5	5	4	11	9	9	9	12	12	10	10
	5	7	6	6	5	13	12	11	12	15	15	12	13
	6	8	7	7	6	16	14	13	14	18	19	14	16
	7	10	8	8	8	19	17	15	17	21	22	17	18
	8	11	9	9	9	22	19	18	19	24	25	19	21

продовження табл. Б.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
20	9	13	11	11	10	24	21	20	22	27	28	22	23
	10	14	12	12	11	27	24	22	24	30	31	24	26
25	1	1	1	1	0	2	2	1	1	2	2	2	1
	2	2	2	2	1	4	4	3	3	5	5	4	3
	3	3	4	3	2	6	7	5	4	7	8	6	5
	4	4	5	4	3	9	9	7	6	10	11	8	6
	5	6	6	5	4	11	11	9	8	12	14	10	8
	6	7	7	5	4	13	14	10	9	15	16	12	10
	7	8	9	6	5	16	16	12	11	17	19	14	11
	8	9	10	7	6	18	18	14	13	20	22	16	13
	9	10	11	8	7	20	21	16	14	22	25	18	15
	10	12	13	9	8	23	23	18	16	25	28	20	16



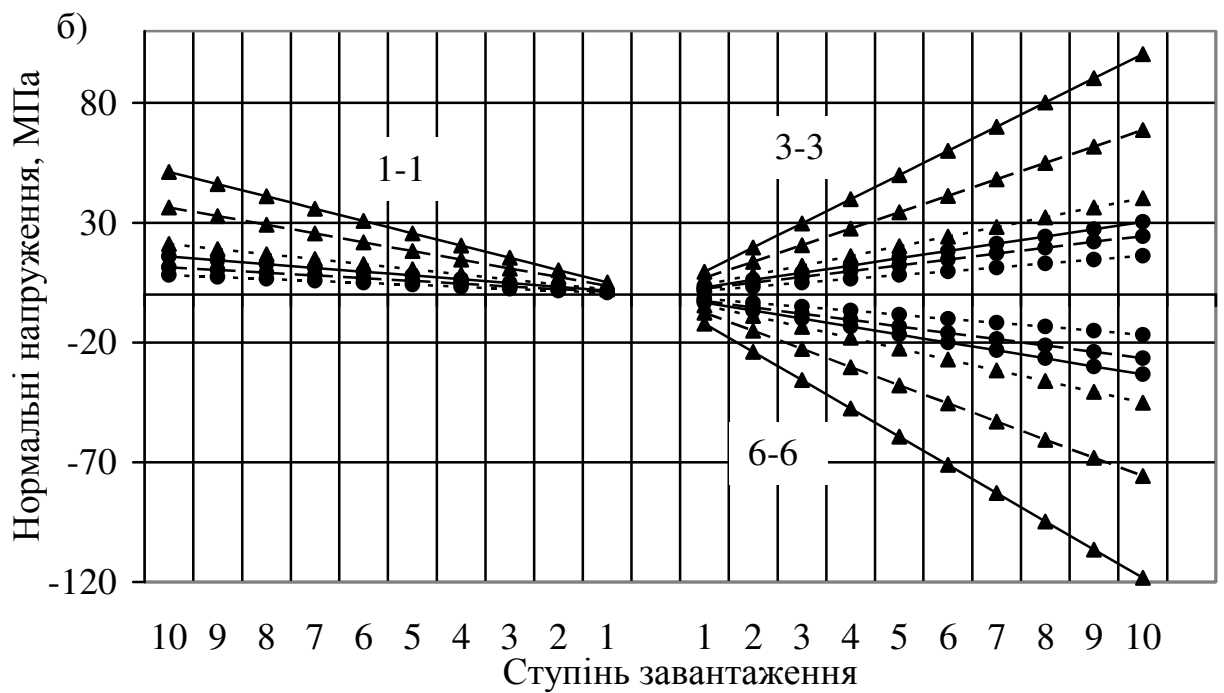
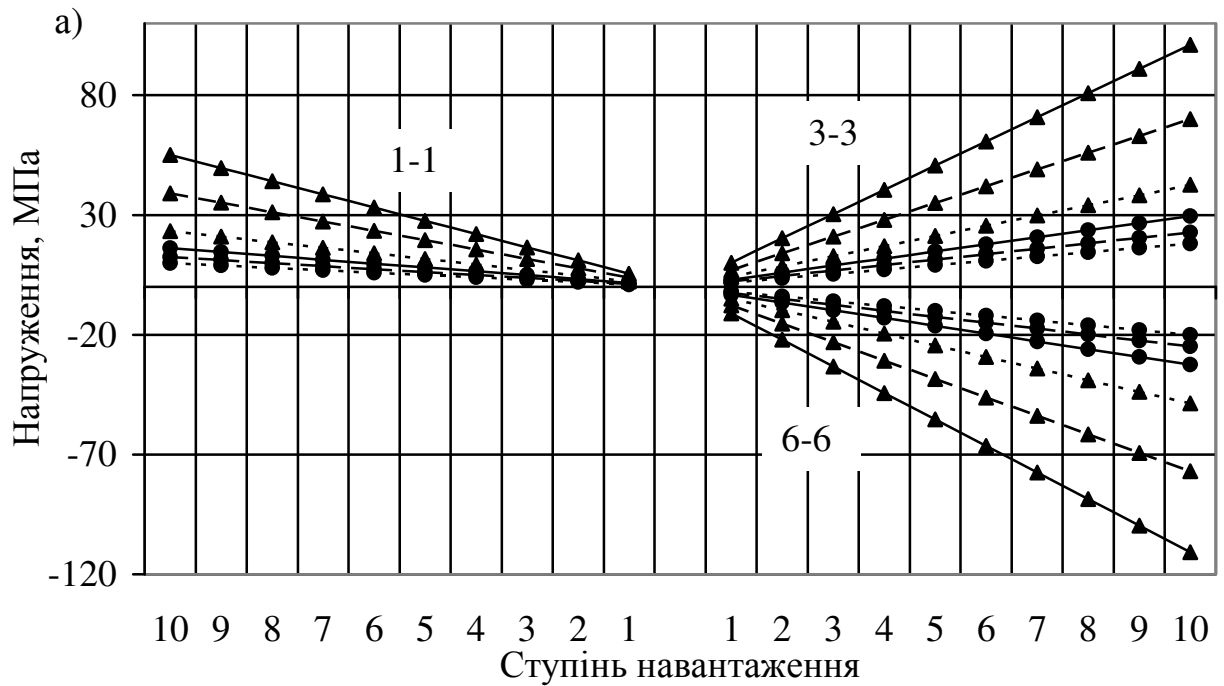
Позначення кривої напружень, якщо кут нахилу конструкції:

—▲— — 0°; --▲-- — 5°; ...▲... — 10°; —●— — 15°; --●-- — 20°; ...●... — 25°

Рисунок Б.1 – Теоретичні нормальні напруження (МПа) в перерізі без отвору  
в полиці перфорованого прогону

а – напруження біля краю полиці; б – напруження біля стінки





Позначення кривої напружень, якщо кут нахилу конструкції:

—▲— —  $0^\circ$ ; -▲- -  $5^\circ$ ; ...▲... —  $10^\circ$ ; —●— —  $15^\circ$ ; -●- -  $20^\circ$ ; ...●... —  $25^\circ$

Рисунок Б.2 – Експериментальні нормальні напруження (МПа) в перерізі без отвору в полиці перфорованого прогону

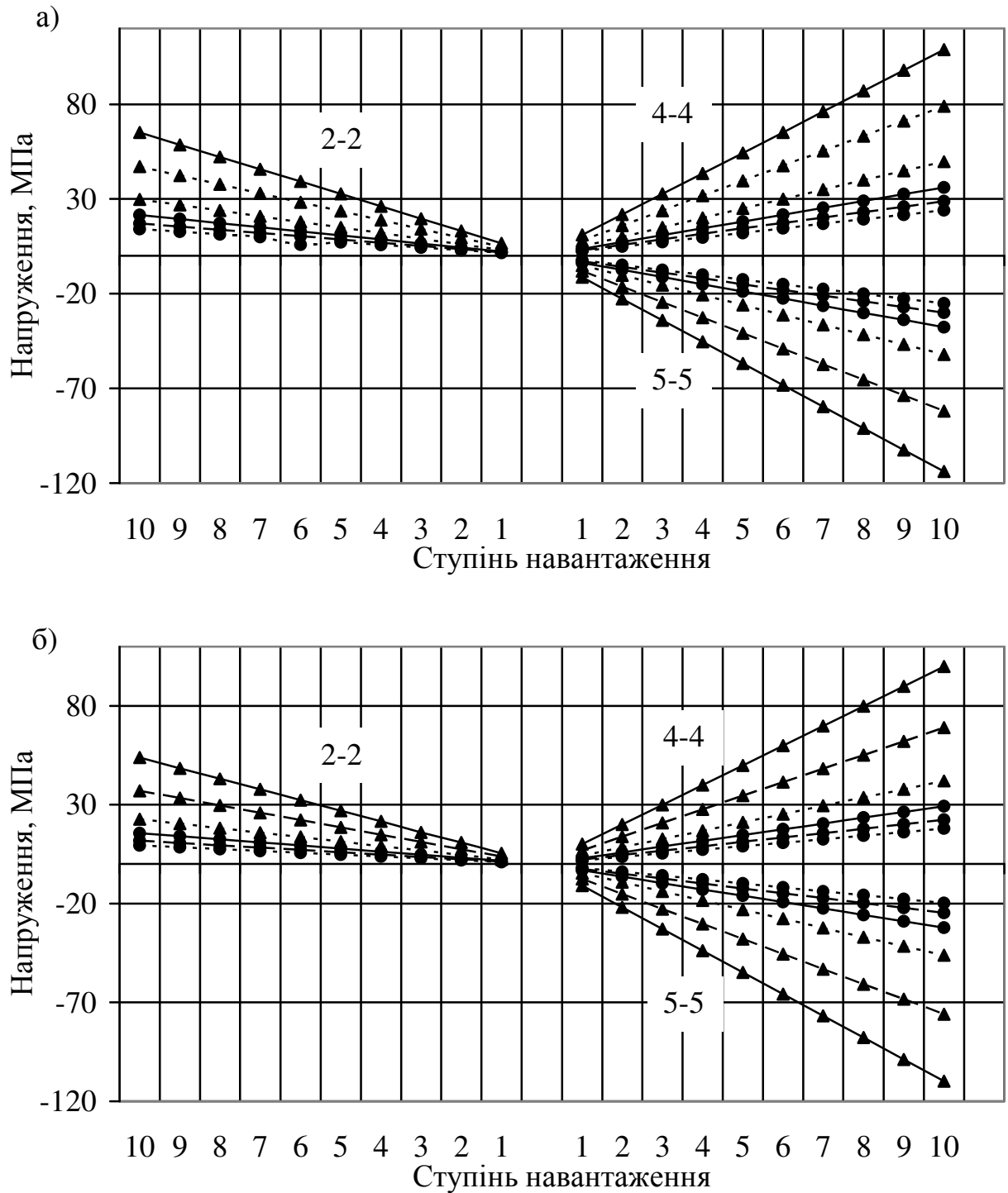
а – напруження біля краю полиці; б – напруження біля стінки

Таблиця Б.3 – Нормальні напруження в полиці перфорованого прогону в  
перерізі з отвором

Кут нахилу	Ступінь навантаження	Нормальні напруження, МПа											
		Переріз 3-3				Переріз 5-5				Переріз 6-6			
		Край		Біля стінки		Край		Біля стінки		Край		Біля стінки	
		$\sigma_T$	$\sigma_e$	$\sigma_T$	$\sigma_e$	$\sigma_T$	$\sigma_e$	$\sigma_T$	$\sigma_e$	$\sigma_T$	$\sigma_e$	$\sigma_T$	$\sigma_e$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	11	13	14
0	1	6	6	5	4	10	11	10	7	11	16	11	11
	2	13	14	10	8	21	22	20	15	22	33	21	23
	3	19	18	16	12	32	34	29	23	34	50	32	34
	4	26	24	21	16	43	45	39	31	45	67	43	46
	5	32	31	26	21	54	57	49	39	56	84	54	58
	6	39	37	32	25	65	68	59	47	68	100	65	69
	7	45	43	37	29	76	79	69	55	79	117	76	81
	8	52	49	43	33	87	91	79	63	91	134	87	92
	9	58	55	48	37	97	102	89	71	102	151	98	104
	10	65	62	53	42	108	114	99	79	113	168	109	116
5	1	4	4	3	3	7	8	6	6	8	11	7	7
	2	9	9	7	6	15	17	13	13	16	22	15	14
	3	14	13	11	10	23	25	20	19	24	33	22	21
	4	18	18	14	13	31	34	27	26	32	44	30	28
	5	23	23	18	17	39	43	34	32	41	55	38	35
	6	28	27	22	20	47	51	41	39	49	66	45	42
	7	32	32	25	23	55	60	48	45	57	77	53	49
	8	37	36	29	27	63	68	55	52	65	88	60	56
	9	42	41	33	30	71	77	62	58	73	99	68	63
	10	47	46	37	34	79	86	69	65	82	111	76	70
10	1	3	2	2	1	5	5	4	3	5	6	4	4
	2	5	5	4	3	9	10	8	7	10	12	9	8
	3	8	8	6	5	14	15	12	11	15	18	13	12
	4	11	10	9	7	19	20	16	15	20	24	18	16
	5	14	13	11	9	24	25	21	19	26	30	23	21
	6	17	16	13	11	29	30	25	23	31	36	27	25
	7	20	18	15	13	34	35	29	27	36	42	32	29
	8	23	21	18	15	39	40	33	31	41	48	37	33
	9	26	24	20	17	44	45	37	35	46	54	41	37
	10	29	27	22	19	49	50	42	39	52	60	46	42
15	1	2	2	1	1	3	3	2	2	3	3	3	3

продовження табл. Б.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
15	2	4	5	3	2	7	7	5	5	7	7	6	6
	3	6	7	4	4	10	11	8	7	11	10	9	9
	4	8	10	6	5	14	15	11	10	15	14	12	12
	5	10	13	7	7	18	19	14	13	18	17	16	15
	6	12	15	9	8	21	22	17	15	22	21	19	18
	7	15	18	10	9	25	26	20	18	26	24	22	21
	8	17	20	12	11	28	30	23	20	30	28	25	24
	9	19	23	14	12	32	34	26	23	33	31	29	27
	10	21	26	15	14	36	38	29	26	37	35	32	30
20	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	2	2
	2	3	3	2	1	5	5	4	4	6	6	4	4
	3	5	4	3	2	8	7	6	6	9	9	7	6
	4	6	6	4	2	11	10	8	8	12	13	9	8
	5	8	7	5	3	14	12	11	10	15	16	12	11
	6	10	9	7	4	17	15	13	12	18	19	14	13
	7	11	10	8	4	20	17	15	14	21	23	17	15
	8	13	12	9	5	23	20	17	16	24	26	19	17
	9	15	13	10	6	25	22	20	18	27	29	22	19
	10	17	15	11	7	28	25	22	21	30	33	24	22
25	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	3	2	1
	2	2	3	1	1	4	5	3	3	5	6	4	3
	3	4	4	2	1	7	8	5	4	7	9	5	4
	4	5	6	3	2	9	10	7	6	10	12	7	6
	5	7	7	4	3	12	13	9	8	12	15	9	7
	6	8	9	5	3	14	16	10	9	15	18	11	9
	7	9	10	6	4	16	18	12	11	17	21	13	10
	8	11	12	7	4	19	21	14	12	20	24	15	12
	9	12	13	8	5	21	24	16	14	22	27	17	13
	10	14	15	9	6	24	27	17	16	25	30	19	15

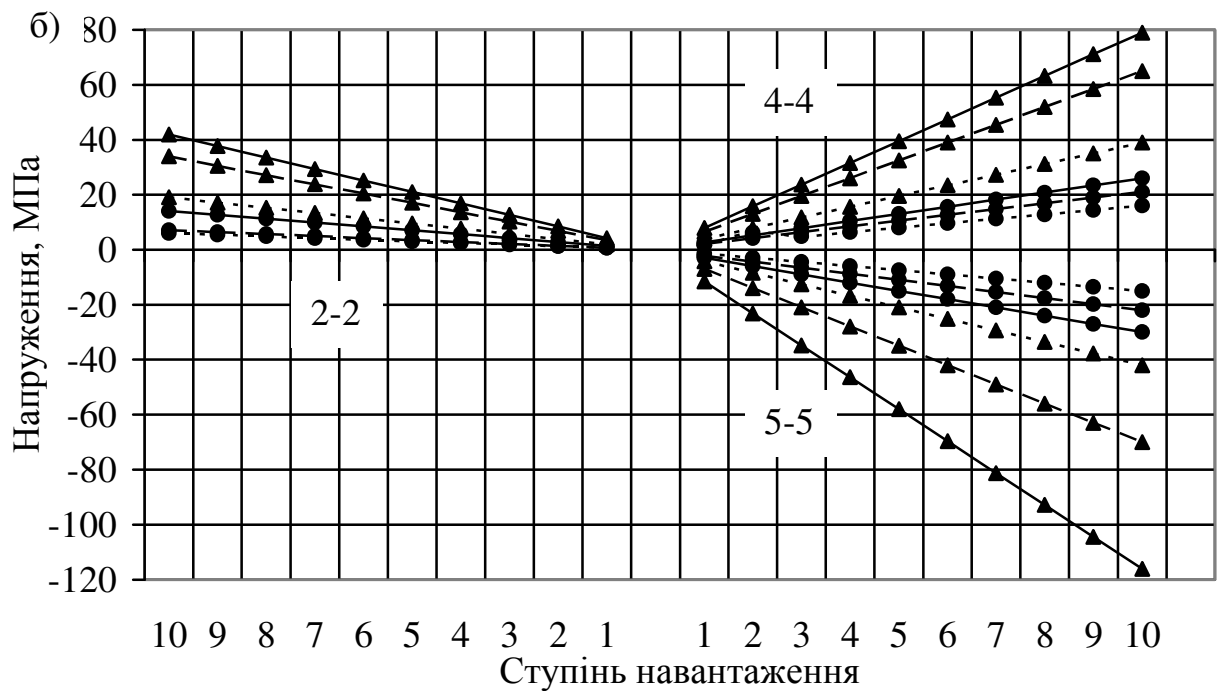
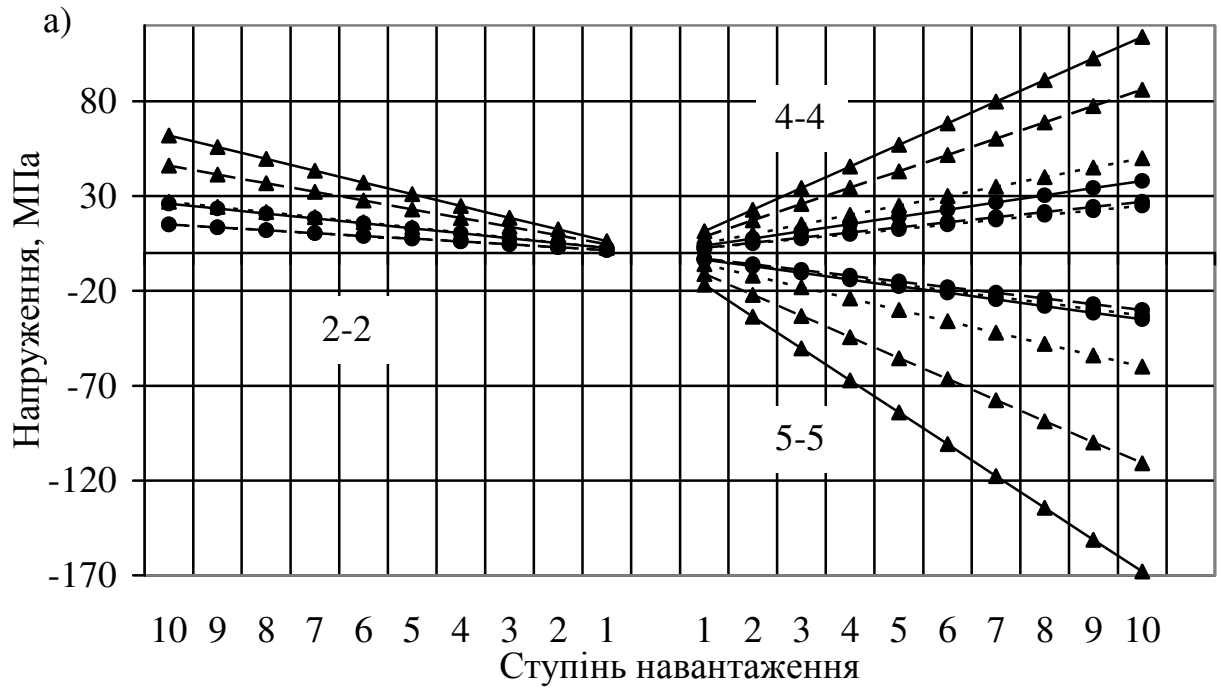


Позначення кривої напружень, якщо кут нахилу конструкції:

—▲— —  $0^\circ$ ; —▲— —  $5^\circ$ ; —▲— —  $10^\circ$ ; —●— —  $15^\circ$ ; —●— —  $20^\circ$ ; —●— —  $25^\circ$

Рисунок Б.3 – Нормальні напруження (МПа) в полиці перфорованого прогону в перерізі з отвором

а – теоретичні значення напружень скраю; б – теоретичні значення напружень біля стінки



Позначення кривої напружень, якщо кут нахилу конструкції:

—▲— —  $0^\circ$ ; -▲- -  $5^\circ$ ; ...▲... —  $10^\circ$ ; —●— —  $15^\circ$ ; -●- -  $20^\circ$ ; ...●... —  $25^\circ$

Рисунок Б.4 – Теоретичні нормальні напруження (МПа) в полиці  
перфорованого прогону в перерізі з отвором

а – напруження біля краю полиці; б – напруження біля стінки

## **ДОДАТОК В.**

**Документи про впровадження результатів дисертаційних досліджень**

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет водного господарства та природокористування

*В. В. Романюк, В. Б. Василенко*

**РОЗРАХУНОК ПЕРФОРОВАНИХ Z-ПОДІБНИХ ПРОФІЛІВ В  
УМОВАХ КОСОГО ЗГИНУ**

*РЕКОМЕНДАЦІЇ*

Рівне–2015

УДК 624.014: 624.024  
ББК 38.54:38.44  
Р69

*Рекомендовано до видання Вченою радою Національного університету водного господарства та природокористування (Протокол № 7 від 04 червня 2015 р.)*

**Рецензенти:**

**Бабич Є.М.**, доктор технічних наук, професор Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне);

**Трач В.М.**, доктор технічних наук, професор Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне);

**Романюк В.В., Василенко В.Б.**

**Р69** Розрахунок перфорованих Z-подібних профілів в умовах косого згину: Рекомендації. – Рівне: НУВГП, 2015. – 44 с.

**ISBN 978-966-8784-20-0**

Наведено методику розрахунку перфорованих елементів, що працюють в умовах косого згину, за граничними станами першої та другої груп. Наведено формули для визначення прогинів та напружень на різних розрахункових ділянках елемента в основних точках перерізів з отворами та без них.

Для наукових працівників, аспірантів, магістрантів і студентів будівельних спеціальностей, інженерно-технічних працівників проектних організацій.

**УДК 624.014:624.024**  
**ББК 38.54:38.44**

**ISBN 978-966-8784-20-0**

© Романюк В. В., Василенко В. Б., 2015  
© Національний університет водного господарства та природокористування, 2015



Довідка

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Василенка В.Б. на тему

**«Напружено-деформований стан перфорованих прогонів Z-подібного профілю в умовах косого згину»**

Результати експериментально-теоретичних досліджень за темою дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес спеціальності 7.06010101 «Промислове і цивільне будівництво» Національного університету водного господарства та природокористування під час викладання дисципліни «Конструкції будівель і споруд з металу, деревини та пластмас» для студентів 5-го курсу, які навчаються за освітньо-кваліфікаційним рівнем «спеціаліст». Зокрема розглядаються конструкція перфорованого прогону Z-подібного профілю та інженерна методика його розрахунку за граничними станами першої та другої груп. Наводиться інформація про раціональну область використання таких конструкцій як для промислових будівель, так і для будівель громадського призначення.

Отримані результати також використовуються під час виконання дипломних проектів під керівництвом професора кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд НУВГП Романюка В.В.

Директор Навчально-наукового інституту  
будівництва та архітектури  
к.т.н., професор

Р.М. Макаренко

Особистий підпис Макаренка Р.М. засвідчую.  
Начальник відділу кадрів



А.І. Музика

Довідка  
про впровадження результатів дисертаційної роботи  
Василенка В.Б. на тему  
**«Напружено-деформований стан перфорованих прогонів Z-подібного  
профілю в умовах косого згину»**

Результати експериментально-теоретичних досліджень за темою дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес спеціальності 8.06010101 «Промислове і цивільне будівництво» Національного університету водного господарства та природокористування під час викладання дисципліни «Прогресивні напрямки дослідження, проектування та застосування будівельних конструкцій» для студентів 5-го курсу, які навчаються за освітньо-кваліфікаційним рівнем «магістр». Зокрема розглядаються конструкція перфорованого прогону Z-подібного профілю, інженерна методика його розрахунку за граничними станами першої та другої груп, розрахунок перфорованих елементів методом скінчених елементів у програмному комплексі «Ліра», методика проведення та основні результати експериментальних досліджень, експериментальна установка, що дозволяє проводити дослідження згинальних елементів за різних кутів нахилу конструкцій прольотом 6 м. Наводиться інформація про раціональну область використання таких конструкцій як для промислових будівель, так і для будівель громадського призначення.

Отримані результати також використовуються під час виконання атестаційних магістерських робіт під керівництвом професора кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд НУВГП Романюка В.В.

Директор Навчально-наукового інституту  
будівництва та архітектури  
к.т.н., професор

Р.М. Макаренко

Особистий підпис Макаренка Р.М. засвідчую.  
Начальник відділу кадрів

А.І. Музика





**Спеціалізованій Вченій раді  
із захисту дисертацій К 47.104.06  
Національного університету водного  
господарства та природокористування**

Довідка

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Василенка В.Б. на тему

**«Напружено-деформований стан перфорованих прогонів Z-подібного профілю в  
умовах косого згину»**

Розроблена в дисертаційній роботі методика розрахунку перфорованих елементів Z-подібного профілю за граничними станами першої та другої груп, запроектованих на основі прокатних швелерів з ухилом внутрішніх граней полиць за ДСТУ 3436-96, базується на чинних нормах проектування ДБН В.2.6 – 163: «Сталеві конструкції» і дозволяє проводити проектування згинальних елементів за різних кутів нахилу покрівлі зі значною економією сталі.

Ця методика була використана під час варіантного проектування прогонів покриття будівель різноманітного призначення, а саме:

- Рівненського оптового ринку сільськогосподарської продукції „Шелен”;
- Адміністративно-виробничої будівлі по вул. Адамківська, 7 в с. Зоря, Рівненського району, Рівненської області.

Директор

ПП "Творчо-виробнича фірма Тріада"



О.В. Голуб